



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA  
NÚCLEO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO  
REGIONAL E MEIO AMBIENTE**

**MAÍRA HILGEMBERG ALVES**

**MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DO SISTEMA AQUÍFERO  
POROSO NA ÁREA URBANA E DE EXPANSÃO DE PORTO VELHO, RONDÔNIA**

Porto Velho (RO)  
2016

MAÍRA HILGEMBERG ALVES

**MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DO SISTEMA AQUÍFERO  
POROSO NA ÁREA URBANA E DE EXPANSÃO DE PORTO VELHO, RONDÔNIA**

Dissertação de Mestrado apresentada junto ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente,  
Área de Concentração em Geociências, para  
obtenção do Título de Mestre em  
Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Vanderlei Maniesi

Porto Velho (RO)  
2016

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**BIBLIOTECA PROF. ROBERTO DUARTE PIRES**

Alves, Maíra Hilgemberg.

A474m

Modelo conceitual hidrogeológico do sistema aquífero poroso na área urbana e de expansão de Porto Velho, Rondônia. / Maíra Hilgemberg Alves, Porto Velho / RO, 2016.

148 fls.

Orientador: Prof. Dr. Vanderlei Maniesi

Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Fundação Universidade Federal de Rondônia.


1. Modelo Conceitual Hidrogeológico 2. Aquífero 3. Porto Velho - RO. I. Maniesi, Vanderlei. II. Título

CDU 556.33 (811.1)


**Bibliotecária responsável: Rejane Sales – CRB 11/903**

**MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DO SISTEMA AQUÍFERO  
POROSO NA ÁREA URBANA E DE EXPANSÃO DE PORTO VELHO,  
RONDÔNIA**

**Comissão Examinadora**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Vanderlei Maniesi**  
**Orientador**  
**Fundação Universidade Federal de Rondônia**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Ene Glória da Silveira**  
**Membro Interno**  
**Fundação Universidade Federal de Rondônia**

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Ana Cristina Santos Strava Correa**  
**Membro Externo**  
**SIPAM/FARO**

**Porto Velho, 25 de novembro de 2016.**

**Resultado:** APROVADA



*Dedico este trabalho  
à minha vó Neldi Hilgemberg Alves (in memoriam),  
pelo imenso amor depositado em mim;  
Amo você.*

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa - FAPERO/CAPES pela bolsa concedida em nível de mestrado.

À Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente – PGDRA pela oportunidade da realização deste estudo.

À Companhia de Águas e Esgotos do Estado de Rondônia - CAERD, Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM, Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão - SEMPLA e Sistema de Proteção da Amazônia - SIPAM pela disponibilização de dados e apoio técnico dos seus servidores.

Ao meu orientador geólogo Dr. Vanderlei Maniesi pelas discussões construtivas, paciência e profissionalismo, desde o projeto até a defesa desta dissertação.

Ao geólogo Me. Luiz Gilberto Dall'Igna por ajudar-me na parte de geoprocessamento e pelo empréstimo de seus livros.

Ao geólogo Dr. Eduardo Chemas Hindi por esclarecer dúvidas sobre hidrogeologia e hidrogeoquímica.

À secretária Maria Izabel da Silva Tavares pela imensa dedicação com os trâmites de matrícula e afins do PGDRA.

Ao *teacher* Claudio Pietrelli pela revisão do *abstract*.

Aos amigos paranaenses que mesmo de longe sempre me enviaram apoio e pensamentos positivos.

Às minhas colegas da pós-graduação pela troca de experiências entre as áreas das humanas, biológicas, ciências exatas e da terra.

À minha família sulista pelo apoio e por não deixar de acreditar em mim em nenhum momento e, em especial, à minha vó Neldi que partiu no ano em que comecei esta dissertação.

Ao geólogo, amigo, companheiro e noivo Gustavo, por todo apoio, paciência, carinho e amor que teve comigo, seja na execução desta dissertação e em todos os momentos da minha vida.

E a todos aqueles que contribuíram, indiretamente, para construção deste trabalho,

Muito obrigada!

*“Eu aprendi que todos querem viver  
no topo da montanha,  
mas toda felicidade e crescimento  
ocorre quando você está  
escalando-a”.*

***Willian Shakespeare***

## RESUMO

Estudos hidrogeológicos foram desenvolvidos na área urbanizada de 117 km<sup>2</sup> de Porto Velho, Rondônia, onde menos de 35% da população possui abastecimento com água encanada. Logo, as águas subterrâneas mostram-se como alternativa de abastecimento, porém estão sujeitas à contaminação antrópica, visto que menos de 2% da sua população é atendida por rede geral de esgoto. O aquífero da área de estudo compreende um sistema hidrogeológico poroso, heterogêneo e anisotrópico com condutividade hidráulica e transmissividade média de  $2 \times 10^{-2}$  cm/s e  $1,8 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, respectivamente, calculados pelo método do ponto de inflexão de Hantush, possuindo propriedades de aquíferos livres, bem como semiconfinados quando envoltos por aquitarde. Constitui-se por coberturas cenozoicas com espessura média de 61,8 metros que sobrepõe às rochas granitoides do embasamento regional. O modelo conceitual hidrogeológico elaborado a partir da estratigrafia de 189 poços provenientes da base de dados do SIAGAS (CPRM, 1997, com atualização permanente), possibilitou a identificação do domínio hidrogeológico poroso e seus subdomínios laterítico e sedimentar, segundo a classificação de Custodio e Llamas (1979), Fetter (2001) e Diniz et al. (2012). O subdomínio laterítico (materiais do perfil laterítico) possui produtividade baixa a muito baixa e vazão específica média de 0,26 m<sup>3</sup>/h/m. De acordo com a classificação de produtividade do subdomínio sedimentar (depósitos sedimentares) foi possível a identificação de três zonas hidrogeológicas: aquitardo, sedimentos indiferenciados e aluvionar. A zona aluvionar denota produtividade alta a muito alta (vazão específica média de 11,4 m<sup>3</sup>/h/m) e localiza-se na porção leste da área de estudo. Em contrapartida, a zona aquitardo apresenta produtividade muito baixa (vazão específica média de 0,39 m<sup>3</sup>/h/m) e localiza-se nas proximidades de drenagens, e a zona sedimentos indiferenciados corresponde a maior parte da área de estudo e exibe uma produtividade moderada a baixa (vazão específica média de 1,9 m<sup>3</sup>/h/m). Os principais locais de recarga localizam-se nos altos topográficos e coincidem com divisores hidrográficos da área de estudo, mas podem estar situados nas menores elevações devido a composição do material da cobertura cenozoica. O comportamento do fluxo subterrâneo mostrou-se radial divergente do centro (locais de recarga) para as bordas da área de estudo com convergência para os igarapés (locais de descarga). A recarga do aquífero foi estimada em 2.347,7 mm/ano, pelo método da flutuação do lençol freático de Healy e Cook (2002). São águas bicarbonatadas sódicas, sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas, bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas abastecidas pela água pluvial. Além disso, são identificadas águas de poços impróprias para o consumo humano por apresentarem elevadas concentrações de nitrato e ferro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aquífero; Modelo Conceitual Hidrogeológico; Porto Velho.

## ABSTRACT

Hydrogeological studies were developed in Porto Velho's urban area of 117 km<sup>2</sup>, Rondônia, where less than 35% of the population has piped water supply. Therefore, groundwater shows up as a supply alternative, but it is subject to anthropogenic contamination, since less than 2% of its population is attended by general sewer system. The area's aquifer comprises a porous, heterogeneous and anisotropic hydrogeological system with hydraulic conductivity and average transmissivity of  $2 \times 10^{-2}$  cm/s and  $1,8 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, respectively, calculated by the method of Hantush's inflection point, and it has properties of free aquifers as well as semi-confined aquifers when surrounded by an aquitard. It is constituted by Cenozoic layers with an average thickness of 61,8 meters that overlaps the granitic rocks of the regional basement. The hydrogeological conceptual model drawn up from the stratigraphy of 189 wells from SIAGAS database (CPRM, 1997 with continuous updating) enabled the identification of the porous hydrogeological domain and its lateritic and sedimentary subdomains, according to the classifications of Custodio and Llamas (1979), Fetter (2001) and Diniz et al. (2012). The lateritic subdomain (lateritic profile materials) has very low to low productivity and average specific flow rate of 0,26 m<sup>3</sup>/h/m. According to the productivity of the sedimentary subdomain (sedimentary deposits) it was possible to identify three hydrogeological zones: aquitard, undifferentiated and alluvial sediments. The alluvial zone has high to very high productivity (average specific flow rate of 11.4 m<sup>3</sup>/h/m) and it is located in the eastern portion of the study area. In contrast, the aquitard zone has very low productivity (average specific flow rate of 0,39 m<sup>3</sup>/h/m) and is located in drainages proximity, and the undifferentiated sediments zone corresponds to most of the study area and displays a low to moderate productivity (specific average flow rate of 1.9 m<sup>3</sup>/h/m). The main recharge sites are located on the topographic high and coincide with hydrographic boundaries of the study area, but may also be located in the lower elevations, due to the composition of the Cenozoic layer material. The behavior of the groundwater flow proved to be radial and divergent from the center (recharge sites) to the border of the study area with convergence to the streams (dumping sites). The aquifer recharge was estimated in 2347.7 mm/year by the water table flotation method by Healy and Cook (2002). The groundwater is sodic bicarbonate, sulfated or chlorinated calcic or magnesian, calcic bicarbonate or magnesian recharged by rainwater. In addition, groundwater wells are identified unfit for human consumption because of high concentrations of nitrate and iron.

**KEYWORDS:** Aquifer; Hydrogeological Conceptual Model; Porto Velho.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Mapa de localização da área de estudo, Porto Velho (RO). Fonte: imagem de satélite Worldview (SEMPA, 2001).....	16
<b>Figura 2</b> - Temperatura da cidade de Porto Velho (RO). Fonte: Fortes (2009) .....	17
<b>Figura 3</b> - Precipitação da cidade de Porto Velho (RO). Fonte: Fortes (2009). .....	17
<b>Figura 4</b> - Balanço hídrico da cidade de Porto Velho (RO), normais climatológicas de 1961 a 1990. Fonte: Fortes (2009).....	17
<b>Figura 5</b> - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Amazonas e do rio Madeira. Fonte: ANA (2011). .....	19
<b>Figura 6</b> - Mapa de localização das sub-bacias da região hidrográfica do rio Madeira, no estado de Rondônia. Fonte: Fernandes (2000). .....	20
<b>Figura 7</b> - Sub-bacias hidrográficas do rio Madeira da área de estudo. Fonte: Fernandes (2000). .....	21
<b>Figura 8</b> - Divisão das sub-bacias hidrográficas da área de estudo. Fonte: modificada de SIPAM (2014). .....	23
<b>Figura 9</b> - Mapa de vegetação da área de estudo. Fonte: Rondônia (1999).....	24
<b>Figura 10</b> - Mapa de geomorfologia da área de estudo. Fonte: modificada de Rondônia (1999) .....	25
<b>Figura 11</b> - Mapa de solos da área de estudo. Fonte: Rondônia (1999). .....	28
<b>Figura 12</b> - Classificação textural de solos. Fonte: Lemos e Santos (1996). .....	29
<b>Figura 13</b> - Mapa geológico da área de estudo, Porto Velho (RO). Fonte: modificada de Oliveira (2013).....	33
<b>Figura 14</b> - Perfil estratigráfico esquemático das ocorrências de materiais lateríticos da área de .....	34
<b>Figura 15</b> - Ciclo hidrogeológico. Fonte: USGS (1879). .....	36
<b>Figura 16</b> - Distribuição da água doce e salgada no planeta. Fonte: Brasil (2007b).....	36
<b>Figura 17</b> - Representação hipotética da subida no nível estático em resposta à precipitação. Fonte: Healy e Cook (2002).....	38
<b>Figura 18</b> - Experimento de Darcy. Fonte: Feitosa et al. (2008).....	40
<b>Figura 19</b> - Quadro relacionando os métodos para cálculos de condutividade hidráulica conforme o tipo de aquífero. Fonte: Kruseman e Ridder (1991).....	41
<b>Figura 20</b> - Representação do rebaixamento pelo tempo no gráfico semilog. Fonte: Fetter (2001). .....	42
<b>Figura 21</b> - Quadro com a relação dos valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica de sedimentos inconsolidados. Fonte: Fetter (2001).....	43
<b>Figura 22</b> - Relação entre rendimento específico (Sy) em azul e retenção específica (Sr) em vermelho. ....	44
<b>Figura 23</b> - Quadro com a relação de rendimento específico (Sy). Fonte: Johnson (1967). .....	44
<b>Figura 24</b> - Quadro com a classificação de produtividade. Fonte: Diniz et al. (2012).....	46
<b>Figura 25</b> - Quadro com a classificação do sistema armazenador pela condutividade hidráulica (cm/s) associada à granulometria e permeabilidade. Fonte: Custodio e Llamas (1976).....	48
<b>Figura 26</b> - Tipos de aquíferos e a relação com a condutividade hidráulica. Fonte: Giampá e Gonçalves (2006). .....	49
<b>Figura 27</b> - Diferentes tipos de aquíferos: A) Isotrópico e homogêneo; B) Anisotrópico e homogêneo; C) Isotrópico e heterogêneo; D) Anisotrópico e heterogêneo.....	50

<b>Figura 28</b> - Quadro com a composição da água subterrânea. Fonte: Freeze e Cherry (1979). .....	52
<b>Figura 29</b> - Representação do diagrama de Piper. Giampá e Gonçalves (2006). .....	53
<b>Figura 30</b> - Mapa de espessura total de areia com a localização da seção esquemática A-A' .....	55
<b>Figura 31</b> - Seção esquemática A – A' ao longo do possível paleocanal demonstrando a continuidade das camadas arenosas. Fonte: modificado de Campos e Morais (1999). .....	56
<b>Figura 32</b> - Fluxograma das etapas do estudo. ....	60
<b>Figura 33</b> - Quadro dos materiais utilizados no estudo. ....	61
<b>Figura 34</b> - Fluxograma da sequência adotada para elaboração do modelo conceitual hidrogeológico. ....	62
<b>Figura 35</b> - Mapa de localização dos pontos de afloramentos visitados. ....	65
<b>Figura 36</b> - Localização dos perfis topográficos 1 a 7 e poços com estratigrafia na área de estudo. ....	67
<b>Figura 37</b> - Modelo digital de terreno (MDT) da área de estudo. ....	71
<b>Figura 38</b> - Mapa de declividade da área de estudo. ....	72
<b>Figura 39</b> - Mapa de localização dos poços separados pela composição da camada superior da área de estudo. ....	74
<b>Figura 40</b> - Quadro do levantamento de informações do memorial descritivo dos poços da granulação, espessura média, mínima e máxima da camada superior da área, além da classificação da unidade armazenadora, com base na porosidade e permeabilidade, Hiscock (2005). .....	75
<b>Figura 41</b> - Mapa de localização dos poços por cota topográfica do embasamento da área de estudo. ....	77
<b>Figura 42</b> - Mapa de localização dos poços por profundidade do embasamento da área de estudo. ....	78
<b>Figura 43</b> - Relação entre número de poços e nível estático (m). ....	79
<b>Figura 44</b> - Mapa de localização dos poços por profundidade do nível estático da área de estudo. ....	80
<b>Figura 45</b> - Relação entre número de poços e rebaixamento (m). .....	81
<b>Figura 46</b> - Mapa de localização dos poços por rebaixamento da área de estudo. ....	82
<b>Figura 47</b> - Gráfico relacionando o número de poços estudados e suas vazões específicas (m <sup>3</sup> /h/m). ....	83
<b>Figura 48</b> - Mapa de localização dos poços por vazão específica da área de estudo. ....	84
<b>Figura 49</b> - Quadro com a relação da produtividade dos poços segundo a classificação de Diniz et al. (2012). .....	85
<b>Figura 50</b> - Quadro da relação da condutividade hidráulica (cm/s), tipo de aquífero, espessura da camada aquífera (m) e transmissividade (m <sup>2</sup> /s) dos poços com teste de bombeamento. ....	86
<b>Figura 51</b> - Mapa de localização dos poços por condutividade hidráulica da área de estudo. ....	51
<b>Figura 52</b> - Mapa potenciométrico e de fluxo subterrâneo da área de estudo. ....	89
<b>Figura 53</b> - Quadro da relação do nível estático (2011-2 a 2013-2) e média, profundidade e cota dos poços. ....	90
<b>Figura 54</b> - Gráfico de variação do nível estático para o poço JR 006-54. ....	90
<b>Figura 55</b> - Gráfico de variação do nível estático para o poço JR 004 – 38. ....	91
<b>Figura 56</b> - Gráfico de variação do nível estático para o poço JQ 991- 41. ....	91
<b>Figura 57</b> - Gráfico de variação do nível estático para o poço JQ 928 - 24. ....	92
<b>Figura 58</b> - Quadro da relação de poços e resultado da recarga direta. ....	92

<b>Figura 59</b> - Mapa de localização dos poços utilizados para o cálculo da recarga direta da área de estudo. ....	94
<b>Figura 60</b> - Precipitação acumulada para o período de outubro de 2011 a março de 2013 (RONDÔNIA, 2015). ....	95
<b>Figura 61</b> - Quadro da relação de poços e seus coeficientes de erro da análise. ....	95
<b>Figura 62</b> - Classificação da água subterrânea da área de estudo no Diagrama de Piper. ....	96
<b>Figura 63</b> - Quadro da relação de poços com a concentração mg/L dos principais íons. ....	97
<b>Figura 64</b> - Quadro da concentração (mg/L) média e máxima dos principais íons dos poços analisados e sua concentração padrão encontrada nas águas subterrâneas, conforme a Feitosa et al. (2008). ....	99
<b>Figura 65</b> - Matakão (A) e detalhe de granitoide (B). Localização: próximo à igreja Santo Antônio, margem direita do rio Madeira. (Ponto – 3, 10/09/2016). ....	100
<b>Figura 66</b> - Modelo conceitual hidrogeológico da área de estudo. ....	103
<b>Figura 67</b> - Detalhe (linha amarela pontilhada) para a laterita coesa, bem cimentada <i>in situ</i> . Na porção superior da laterita coesa encontra-se a construção da Universidade Federal de Rondônia - Centro, e na porção inferior, piso de cimento-calçada. Localização: UNIR - Centro. (Ponto – 1, cota 79 metros, 10/09/2016). ....	104
<b>Figura 68</b> - Laterita coesa bem alterada, com preservação de estruturas colunares em um corte de estrada na Estrada Santo Antônio. O detalhe (linha amarela pontilhada) mostra a facilidade de desagregação (Ponto 4, cota 90 metros, 10/09/2016). Localização: Estrada Santo Antônio. ....	105
<b>Figura 69</b> - Matakão de laterita coesa bem alterada e cobertura gerada pela sua decomposição, composta por materiais finos com presença de grânulos, seixos e blocos (Ponto 13, cota 74 metros, 10/09/2016). Localização: Av. Calama. ....	106
<b>Figura 70</b> - Visão geral do afloramento (A) e detalhe (linha amarela pontilhada) do contato do horizonte mosqueado (abaixo) com a laterita incoesa (B). (Ponto 7, cota 94 metros, 10/09/2016). Localização: próximo à Faro. ....	107
<b>Figura 71</b> - Horizonte mosqueado, delimitado entre as linhas pontilhadas amarelas (Ponto 15, cota 83,5 metros, 17/09/2016). Localização: próximo à Av. Jatuarana. ....	108
<b>Figura 72</b> - Estrutura sedimentar de ambiente fluvial (estratificação cruzada) em um depósito arenoso (Ponto 16, 17/09/2016). Localização: estrada dos Piriquitos, cava de areia Piauí. ....	110
<b>Figura 73</b> - Contato (linha amarela pontilhada) entre o depósito aluvionar do rio Madeira (acima) com o depósito de colúvio formado por lateritas incoesas (abaixo). (Ponto 2, cota 56,6 metros, 10/09/2016). Localização: próximo à estação ferroviária Madeira-Mamoré. ....	111
<b>Figura 74</b> - Contato entre o depósito aluvionar com o horizonte mosqueado (A). Bloco de areia coesa, mal selecionada, levemente ferruginizado (B). (Ponto 14, cota 71 metros, 17/09/2016). ....	112



## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ASPECTOS FISIOGRAFICOS.....</b>	<b>15</b>
1.1 LOCALIZAÇÃO.....	15
1.2 CLIMA.....	15
<b>1.2.1 Balanço hídrico climatológico normal.....</b>	<b>15</b>
1.3 BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	18
<b>1.3.1 Sub-bacias urbanas.....</b>	<b>22</b>
1.4 VEGETAÇÃO.....	22
1.5 GEOMORFOLOGIA.....	22
<b>1.5.1 Planícies aluvionares.....</b>	<b>22</b>
<b>1.5.2 Superfície de aplainamento.....</b>	<b>26</b>
1.6 SOLOS .....	26
<b>1.6.1 Gleissolos distróficos .....</b>	<b>26</b>
<b>1.6.2 Latossolos vermelho – amarelos distróficos.....</b>	<b>26</b>
1.7 GEOLOGIA.....	29
<b>1.7.1 Embasamento proterozoico.....</b>	<b>29</b>
<b>1.7.2 Cobertura cenozoica.....</b>	<b>30</b>
<b>2 HIDROGEOLOGIA E HIDROGEOQUÍMICA .....</b>	<b>35</b>
2.1 ELEMENTOS DO CICLO HIDROLÓGICO.....	35
2.2 RECARGA E DESCARGA.....	35
<b>2.2.1 Recargas.....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.2 Descargas.....</b>	<b>39</b>
2.3 PROPRIEDADES DO AQUÍFERO.....	39
<b>2.3.1 Condutividade hidráulica .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.2 Permeabilidade intrínseca.....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.3 Porosidade.....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.4 Rendimento e retenção específica.....</b>	<b>44</b>
<b>2.3.5 Transmissividade.....</b>	<b>45</b>
2.4 PRODUTIVIDADE.....	45
2.5 AQUÍFEROS.....	46
<b>2.5.1 Tipos de aquíferos.....</b>	<b>48</b>
<b>2.5.2 Homogeneidade, heterogeneidade, anisotropia e isotropia.....</b>	<b>49</b>
2.6 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.....	50
2.7 COMPOSIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	51
<b>2.7.1 Balanço iônico.....</b>	<b>52</b>
<b>3 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO E HIDROQUÍMICO.....</b>	<b>54</b>
3.1 HIDROGEOLOGIA REGIONAL E LOCAL.....	54
3.2 HIDROGEOQUÍMICA REGIONAL E LOCAL.....	56
<b>4 IMPORTÂNCIA DO AQUÍFERO NO DESENVOLVIMENTO REGIONAL.....</b>	<b>57</b>
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>60</b>
5.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO E DECLIVIDADE.....	62
5.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E TRANSMISSIVIDADE.....	63

5.3	RECARGA DIRETA.....	64
5.4	TRABALHOS DE CAMPO.....	64
5.5	PERFIS HIDROESTRATIGRÁFICOS .....	66
5.6	SUPERFÍCIE POTENCIOMETRIA, FLUXO SUBTERRÂNEO E ÁREAS DE RECARGA E DESCARGA.....	66
5.7	CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	68
5.8	SUBDOMÍNIOS E MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICOS.....	68
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>70</b>
6.1	MODELO DIGITAL DO TERRENO E DECLIVIDADE.....	70
6.2	HIDROGEOLOGIA.....	73
6.2.1	Arcabouço e composição do sistema aquífero poroso da área de estudo.....	73
6.2.2	Parâmetros hidráulicos do aquífero poroso .....	79
6.2.3	Fluxo subterrâneo e áreas de recarga e descarga.....	88
6.2.4	Recarga direta.....	90
6.3	HIDROGEOQUÍMICA.....	95
6.3.1	Balanco iônico.....	95
6.3.2	Classificação no Diagrama de Piper.....	96
6.3.3	Características e origem dos íons da água subterrânea.....	97
6.4	MODELO CONCENTUAL HIDROGEOLÓGICO.....	100
6.4.1	Subdomínio hidrogeológico laterítico.....	104
6.4.2	Subdomínio hidrogeológico sedimentar.....	109
	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>115</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>117</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>124</b>

## INTRODUÇÃO

O contexto hidrogeológico da porção sudoeste da Amazônia Legal, onde está inserido o estado de Rondônia, apresenta uma significativa quantidade de água doce pela contribuição das águas pluviais, principalmente nos chuvosos meses de novembro a fevereiro. Parte dessas águas abastece diretamente seus rios e igarapés; outra parte retém-se na camada superior do solo a qual será evaporada; o restante percola em direção às camadas inferiores para alimentar o sistema aquífero, movimentando-se pelas fissuras das rochas ou poros dos sedimentos como parte dos componentes do ciclo hidrológico. Nesse contexto, estima-se que apenas 2,5% das águas disponíveis do planeta correspondem à água doce. Destas, cerca de 97% do manancial potável provém das águas subterrâneas e somente 3% é encontrado na superfície (FEITOSA et al., 2008; ANA, 2012).

Diante desse panorama, para que sua disponibilização seja assegurada à atual e às futuras gerações, conforme o Inciso I, artigo 2º da Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997), torna-se necessário o conhecimento de sistemas aquíferos que poderão auxiliar na gestão e no planejamento dos recursos hídricos subterrâneos, além da prospecção de novos aquíferos.

No estado de Rondônia, dado o declínio do ciclo da borracha, sua economia tendenciou para os setores da mineração, produção agrícola e geração de energia elétrica, tendo atraído migrantes, de maneira especial, para os centros urbanos do estado. Com isso, tornou-se imprescindível a criação de um sistema de abastecimento de água e esgoto e em 4 de março de 1969, foi fundada a Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia (CAERD), pelo Decreto-Lei nº 490 (BRASIL, 1969), a qual é responsável pela captação da água do rio Madeira e do sistema aquífero, nas proximidades do perímetro urbano de Porto Velho.

No período de 2007 a 2010 houve aumento significativo de 16% da população no município de Porto Velho e, especificamente em 2010, somente o perímetro urbano contava com cerca de 369.361 habitantes, o que representava 86% da população (IBGE, 2010). Esse fato pode estar relacionado ao início das obras de implantação da usina hidrelétrica Santo Antônio, em 2008, localizada a sudoeste da área urbana de Porto Velho, a qual atraiu muitos migrantes.

Entre os anos de 2009 e 2010 ocorreu redução relativa dos serviços públicos de abastecimento de água, onde 38,3% da população possuía água encanada disponível para o consumo. Até 2014, o percentual desses serviços caiu para 34,47% e os de captação de esgoto contemplavam apenas 2,07% (BRASIL, 1996). A fim de atenuar tal situação que ocorre também em outros estados do Brasil, foi lançado em 2007, o Programa de Aceleração do

Crescimento – PAC (BRASIL, 2007a), com vistas à melhoria dos setores necessários para o desenvolvimento regional, sendo o estado de Rondônia contemplado, por exemplo, com a ampliação do sistema de abastecimento de água e captação de esgoto. No entanto, as metas do PAC, em Rondônia, ainda não foram atingidas e a população carece desses serviços públicos básicos. Apesar da construção de poços e de fossas sépticas ser raramente planejada tecnicamente, regulamentada e fiscalizada pelos órgãos públicos, as águas subterrâneas da área urbana e entorno de Porto Velho mostram-se uma fonte alternativa imperiosa para o abastecimento público.

De acordo com a pesquisa de Silva Filho e Campos (2001), apenas 20% dos poços apresentam relatório de perfuração e atualmente, os estudos disponíveis desse sistema aquífero em Porto Velho estão restritos aos trabalhos de Campos (1998), Moraes (1998), Campos e Moraes (1999), entre outros mais localizados, que demonstram a carência de informações hidrogeológicas detalhadas.

Assim, o presente estudo visa a elaboração de um modelo conceitual hidrogeológico por meio da análise da hidrogeologia do sistema aquífero poroso em partes do perímetro urbano e proximidades de Porto Velho. Para tal, primeiramente foi realizado um levantamento bibliográfico da fisiografia, hidrogeologia, dados de análises físico-químicas das águas subterrâneas, curvas de nível de 1 metro, perfis estratigráficos, precipitação, temperatura e teste de bombeamento. Após o retrabalhamento e análise desses dados nos *softwares* ArcGis 10.1, CorelDRAW trial, Microsoft Windows, foi gerado o modelo digital de elevação, mapa de declividade, mapa de superfície potenciométrica e construções de seções hidroestratigráficas. Com esses produtos, definiu-se o sentido de fluxo subterrâneo, áreas de recarga e descarga, produtividade, subdomínios hidrogeológicos, taxa de recarga e classificação do tipo de água subterrânea do sistema aquífero poroso de Porto Velho. Além dessas informações, foram realizadas duas etapas de campo para o detalhamento dos dados levantados que foram utilizados na elaboração do modelo conceitual hidrogeológico proposto neste estudo.

## 1 ASPECTOS FISIOGRAFICOS

### 1.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está localizada no norte do estado de Rondônia, incluindo partes do perímetro urbano e da área de expansão da capital Porto Velho. O principal acesso é terrestre, pela BR-364, que liga Porto Velho a Rio Branco/AC (norte) e a Ariquemes/RO (sul). Outro acesso pode ser realizado via fluvial, pela ponte Rondon-Roosevelt, inaugurada em setembro de 2014, por onde se tem acesso a Humaitá/AM, pela BR-319. A área de estudo abrange uma extensão de aproximadamente 117 km<sup>2</sup> entre as coordenadas geográficas 8°48'46,7" e 8°41'59,45" de latitude ao sul e 63°56'24,5" e 63°46'55,3" de longitude oeste (**Figura 1**).

### 1.2 CLIMA

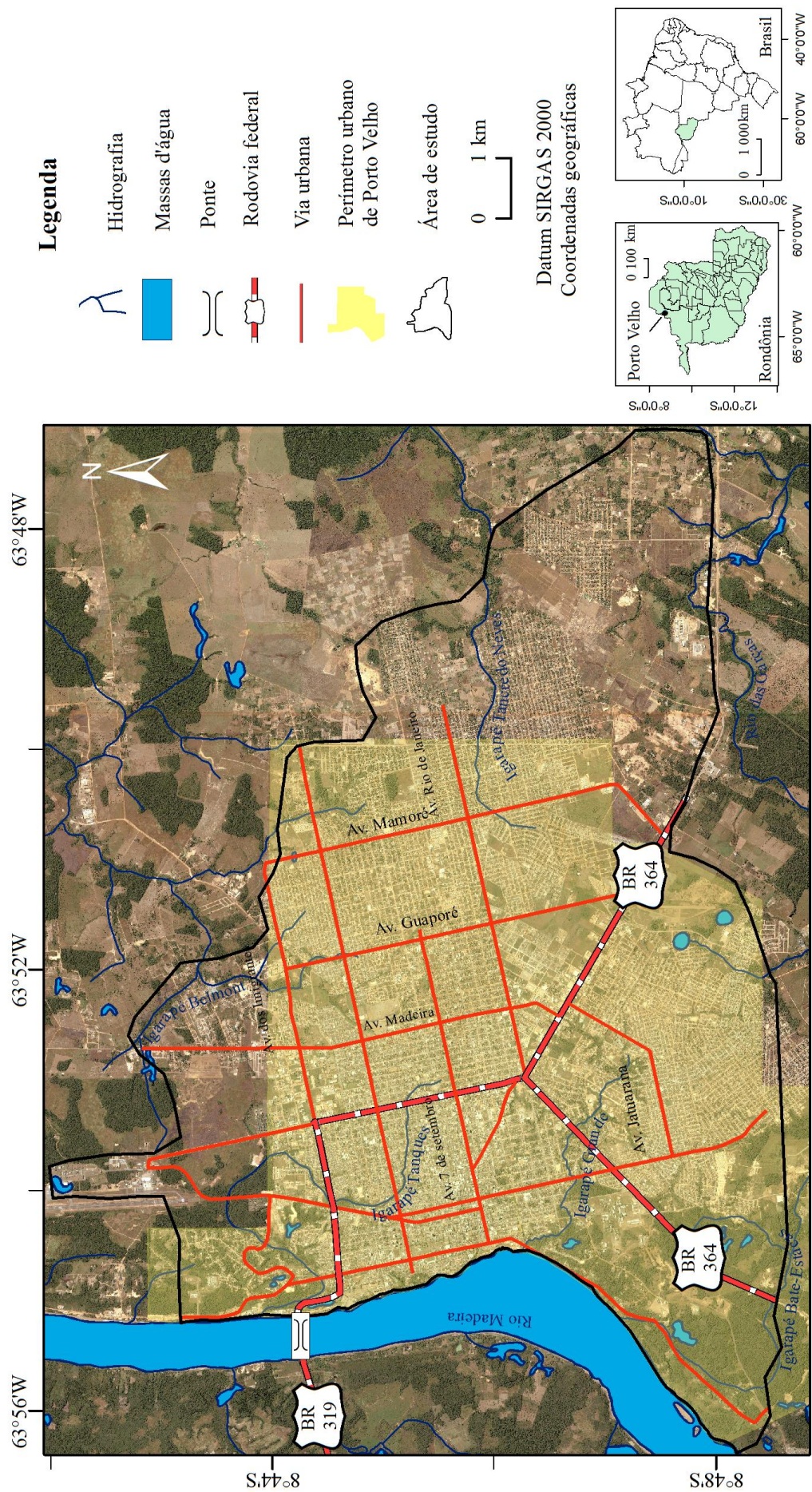
Na área de estudo há uma relação entre a temperatura mínima e máxima de apenas 1,6°C, com média de 25,6°C (FORTES, 2009), **Figura 2**. O período de maior abundância de chuvas é entre os meses de novembro e maio, com precipitação média de 94 mm, sendo a menor de 24,2 mm (julho) e a maior de 320,9 mm (janeiro), **Figura 3**. Conforme a classificação de Köppen, o clima é do tipo Aw – Clima tropical chuvoso (SEDAM, 2012).

#### 1.2.1 Balanço hídrico climatológico normal

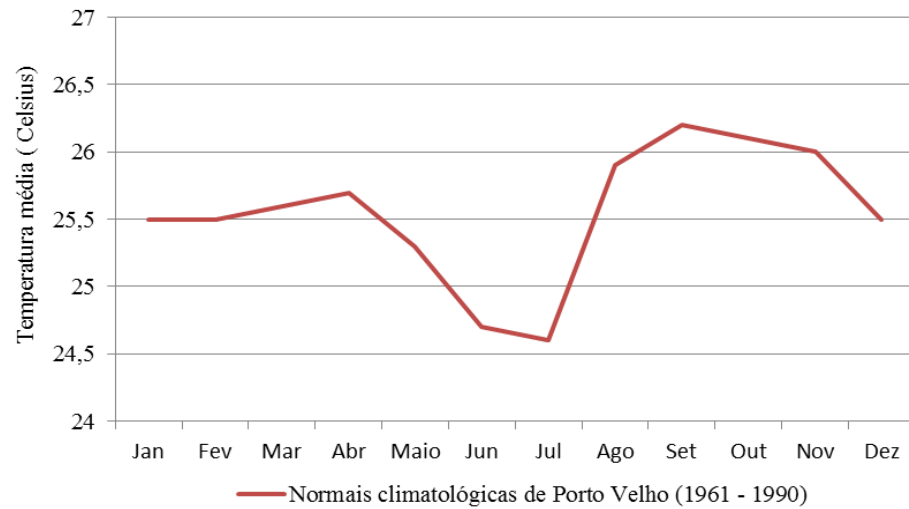
A água que compõe o ciclo hidrológico pode ser quantificada através do balanço hídrico representado pelo extrato de água positivo ou negativo, no ciclo hidrológico. Feitosa et al. (2008) destacam que o balanço hídrico representa a variação do armazenamento por um determinado tempo que é igual a entrada e saída de água do sistema, o qual obedece o princípio de conservação de massa. Em conformidade com as normais climatológicas para o período de 1961 a 1990 (FORTES, 2009), por meio do método de Thornthwaite e Matter (1955), Porto Velho apresenta um saldo positivo entre os meses de outubro a maio, e um saldo negativo entre junho a setembro (**Figura 4**). O maior excedente histórico médio ocorre no mês de fevereiro (201,5 mm) e o maior déficit ocorre em agosto (-73,42 mm), que caracteriza o “inverno” e o “verão” amazônico.



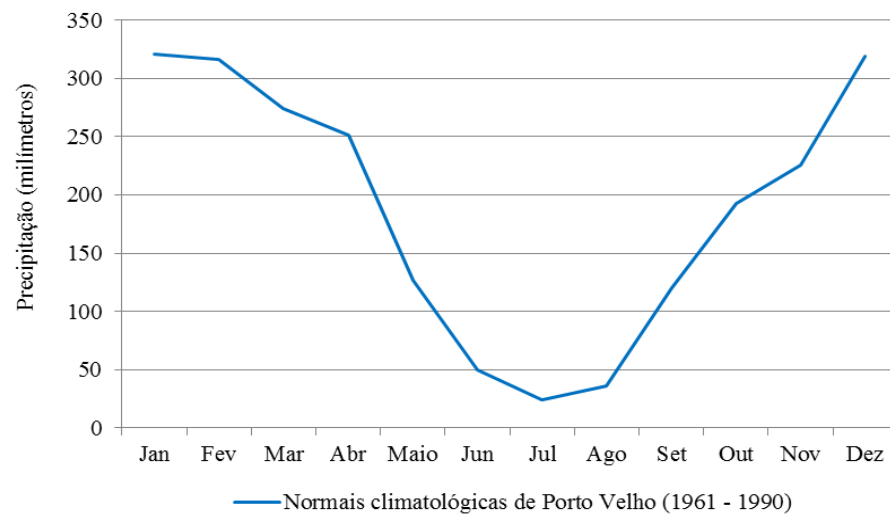
**Figura 1** - Mapa de localização da área de estudo, Porto Velho (RO). Fonte: imagem de satélite *Worldview* (SEMPLA, 2001).



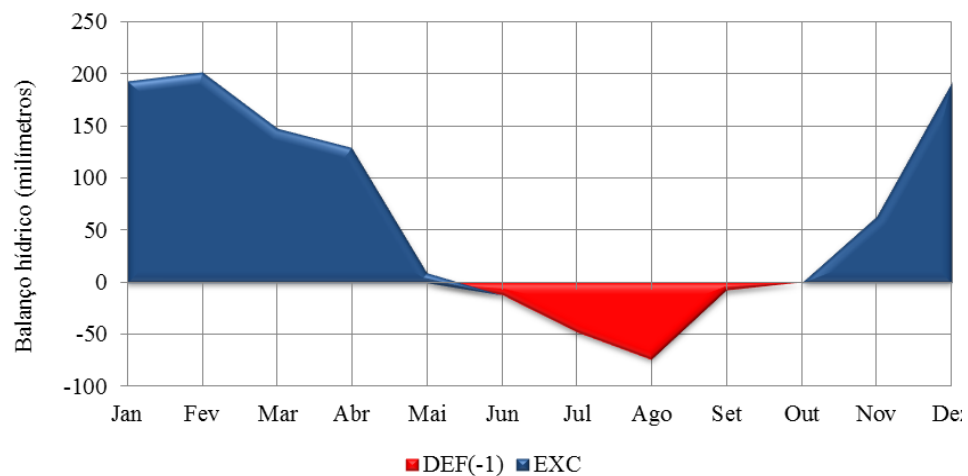
**Figura 2** - Temperatura da cidade de Porto Velho (RO). Fonte: Fortes (2009).



**Figura 3** - Precipitação da cidade de Porto Velho (RO). Fonte: Fortes (2009).



**Figura 4** - Balanço hídrico da cidade de Porto Velho (RO), normais climatológicas de 1961 a 1990. Fonte: Fortes (2009).



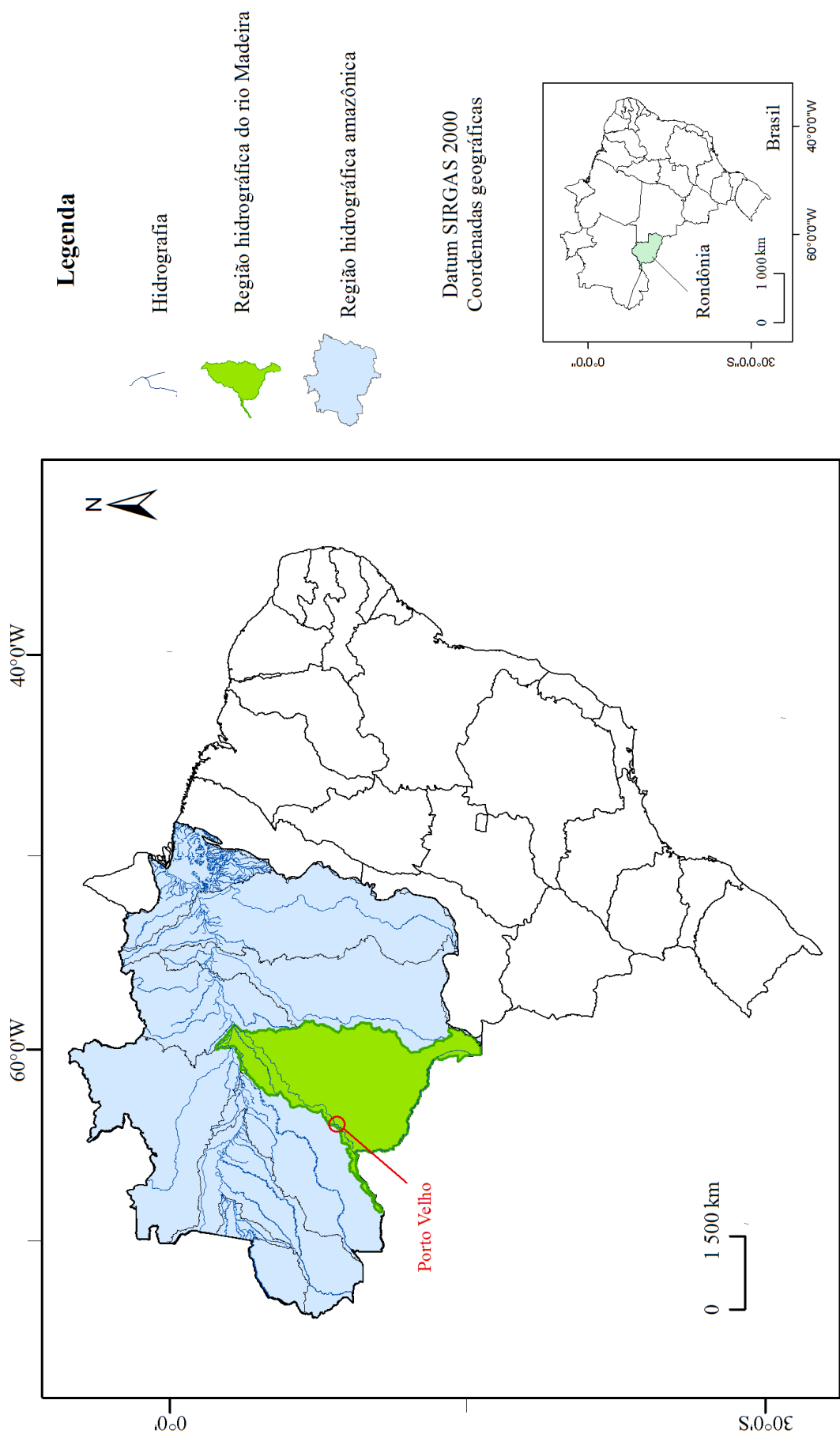
### 1.3 BACIAS HIDROGRÁFICAS

Na porção sul da região hidrográfica do rio Amazonas está inserida a bacia hidrográfica do rio Madeira que recobre o estado de Rondônia (**Figura 5**), com cerca 31.422,1 km<sup>2</sup> (FERNANDES, 2000). No limite norte desta bacia hidrográfica tem-se a divisa dos estados de Rondônia e do Amazonas. Em Rondônia, ela foi dividida por Fernandes (2000) em sete bacias menores: Abunã, Guaporé, Jamari, Machado, Madeira, Mamoré, Roosevelt (**Figura 6**).

A região hidrográfica do rio Madeira, em Rondônia, também foi dividida por Fernandes (2000) em 7 sub-bacias, assim denominadas: Alto Rio Madeira, Médio Rio Madeira, Rio Ribeirão, Rio Mutum-Paraná, Alto Rio **Jaci**-Paraná e Baixo Rio Jaci-Paraná. A área urbana e de expansão de Porto Velho estão inseridas na sub-bacia Médio Rio Madeira, porção noroeste da bacia do rio Madeira (**Figura 7**).



Figura 5 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Amazonas e do rio Madeira. Fonte: ANA (2011).



**Figura 6** - Mapa de localização das sub-bacias da região hidrográfica do rio Madeira, no estado de Rondônia. Fonte: Fernandes (2000).

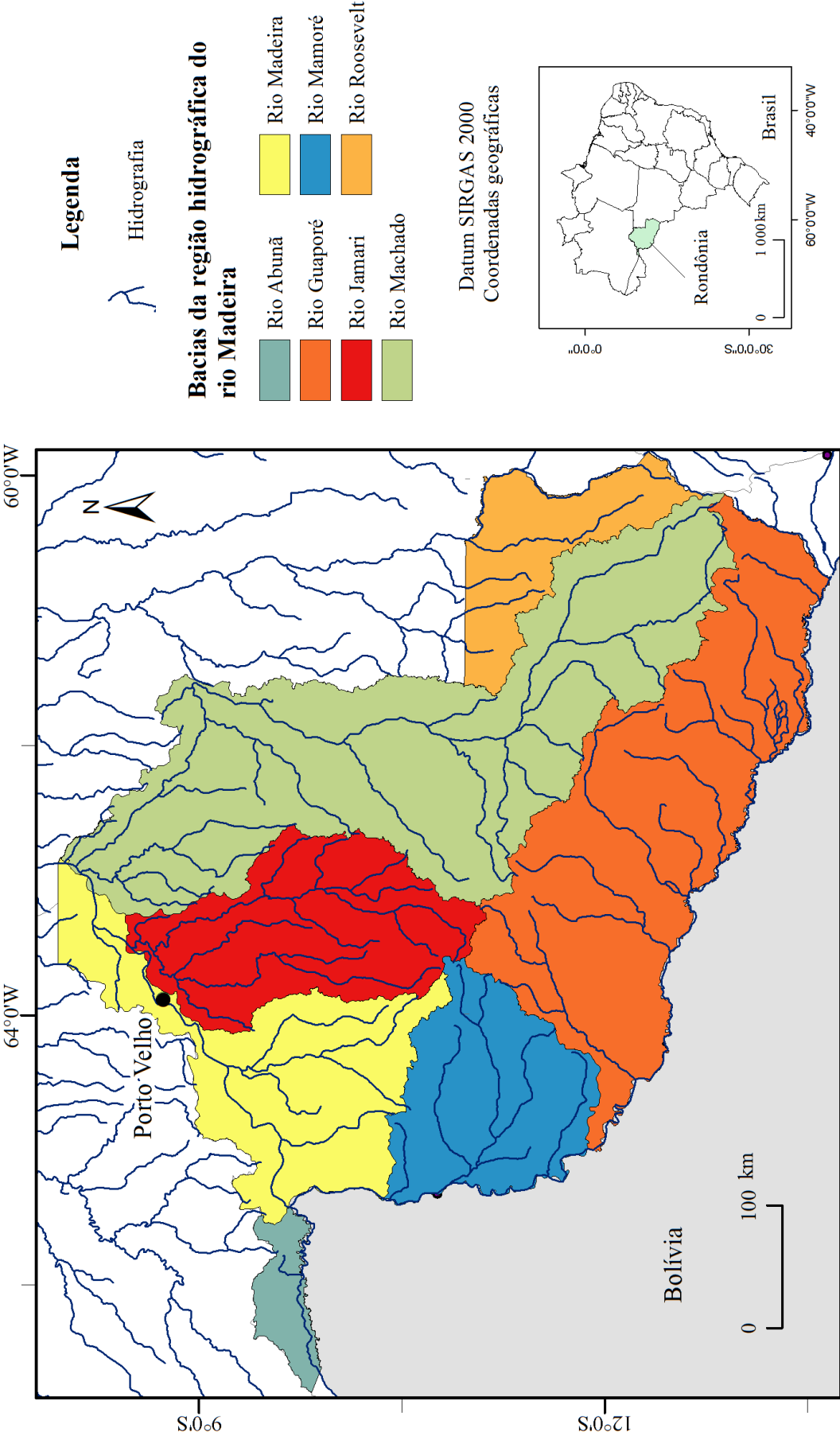
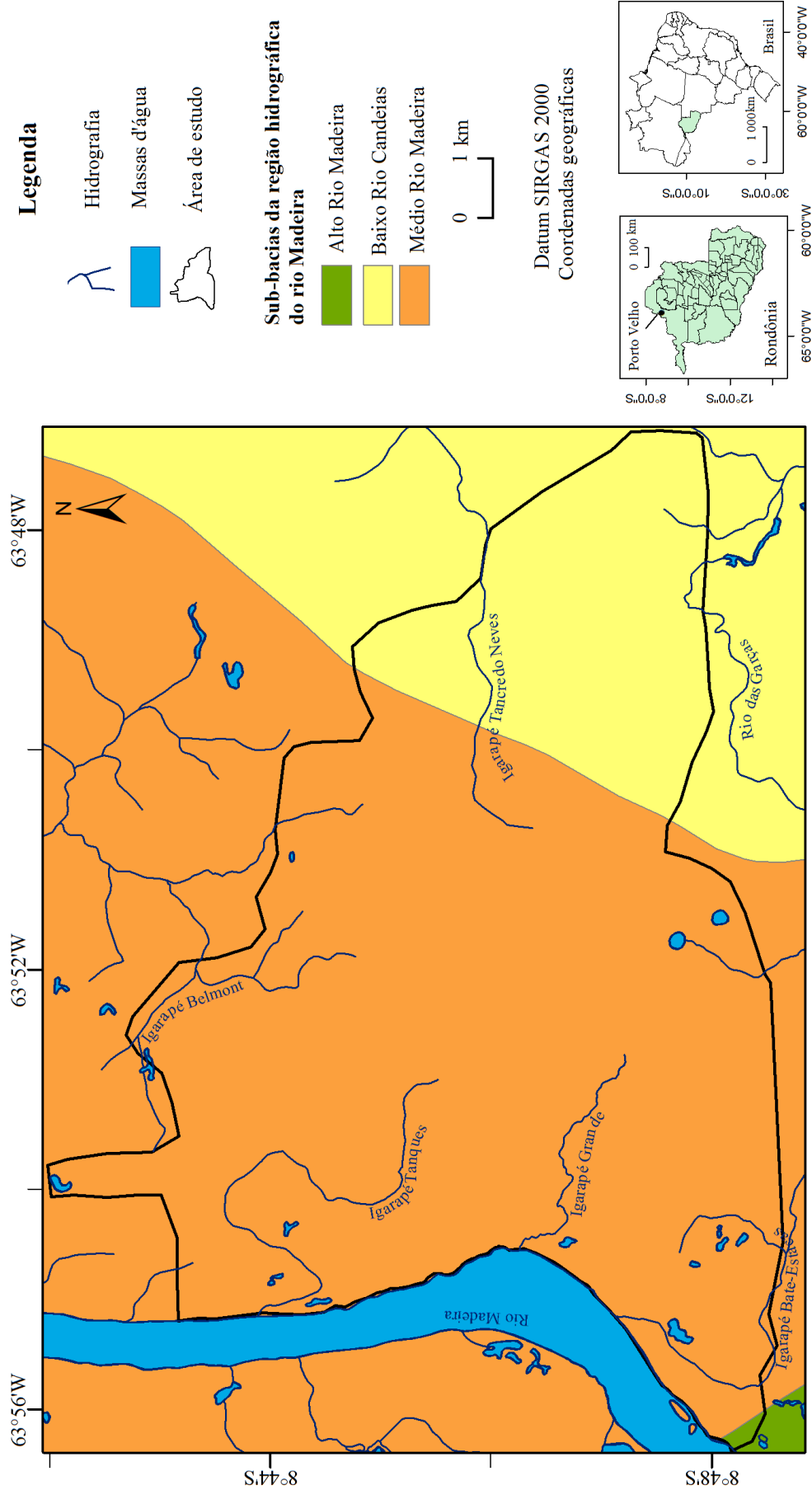


Figura 7 - Sub-bacias hidrográficas do rio Madeira da área de estudo. Fonte: Fernandes (2000).



### 1.3.1. Sub-bacias urbanas

A cidade de Porto Velho abrange seis sub-bacias: Bate Estacas, Belmont, Grande, Rio das Garças, Tancredo Neves e Tanques, **Figura 8** (modificada de SIPAM, 2014), onde estão inseridos os igarapés Bate Estacas, Belmont, Grande e Tanques, que deságuam diretamente no rio Madeira, e o igarapé Tancredo Neves o rio das Garças, que deságuam no rio Candeias do Jamari, afluente do rio Madeira.

## 1.4 VEGETAÇÃO

A constante expansão urbana na cidade de Porto Velho, principalmente em direção à sua porção leste, implicou na preservação de 10,3% de sua área verde restrita em parques, praças e no entorno dos igarapés e rios, em 2015 (GUIMARÃES; SILVA, 2015). O entorno da área de estudo é constituído por uma vegetação do tipo Ombrófila Aberta de Terras Baixas ou Ombrófila Aberta Submontana (**Figura 9**), conforme Rondônia (1999).

## 1.5 GEOMORFOLOGIA

Os processos da evolução da paisagem da cidade de Porto Velho resultaram em uma geomorfologia com formas do Planalto Rebaixado da Amazônia, constituindo o relevo plano a suavemente ondulado, muito pouco dissecado (MELO et al., 1978). Localmente, pode exibir porções do terreno com grau de dissecção mais acentuado. As unidades de agradação da área de estudo são constituídas por Planícies Aluvionares enquanto que as unidades de degradação são representadas pelas Superfícies de Aplainamento (**Figura 10**).

### 1.5.1 Planícies aluvionares

Planícies Aluvionares mapeáveis na escala de trabalho referem-se às planícies fluviais e estão distribuídas junto às margens dos rios Madeira e Garças, bem como aos igarapés Grande, Tanques, Belmont, Tancredo Neves e Bate Estacas. São porções do terreno que apresentam declividade inferior a 1%, com larguras inferiores a 5 km, referindo-se a planícies inundáveis sazonais. Correspondem à unidade geológica depósitos aluvionares e com ocorrência da classe de solo Glei.

Figura 8 - Divisão das sub-bacias hidrográficas da área de estudo. Fonte: modificada de SIPAM (2014).

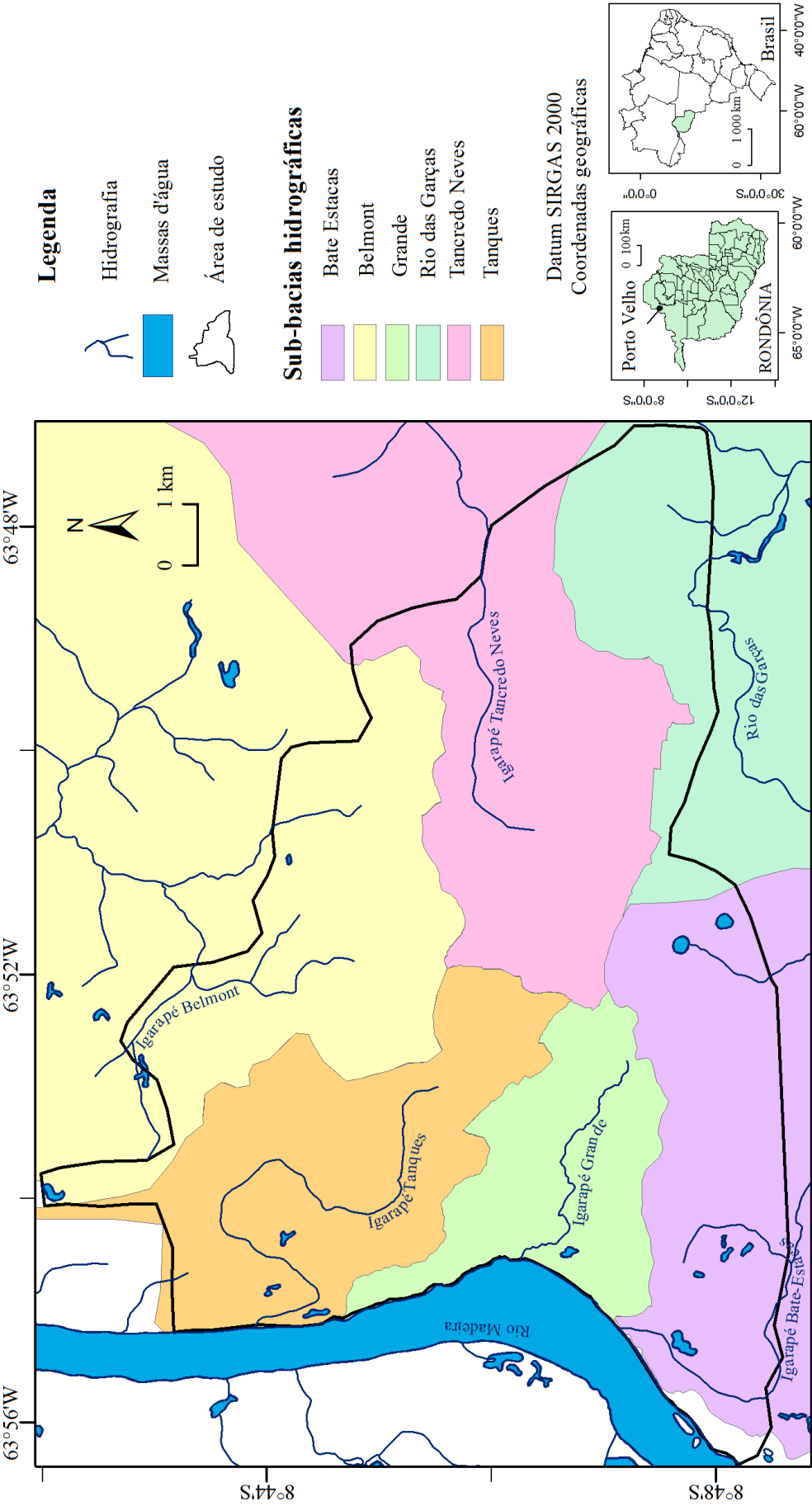


Figura 9 - Mapa de vegetação com áreas de preservação permanente (APP) da área de estudo. Fonte: Rondônia (1999) e SEMPLA (2001).

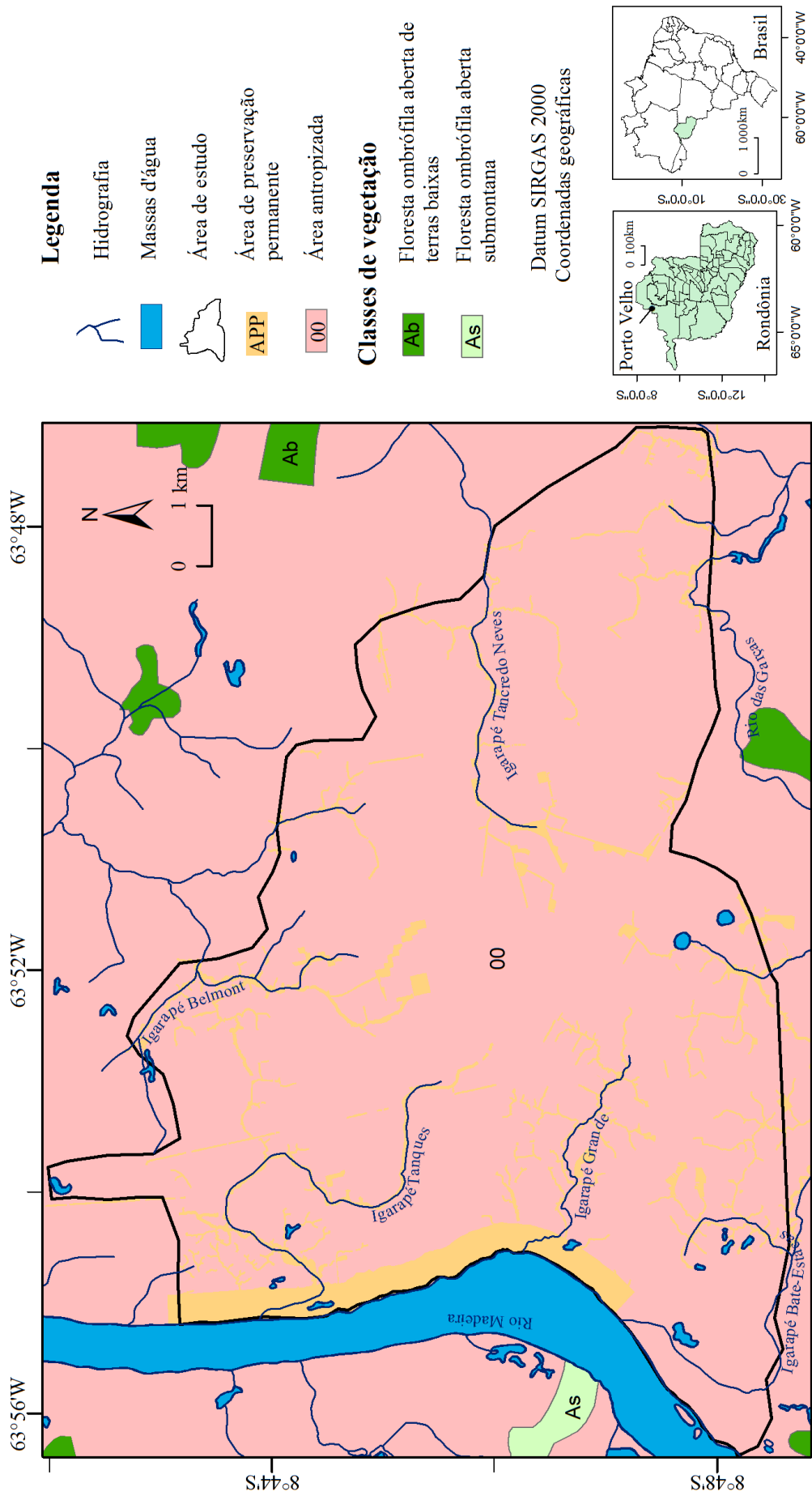
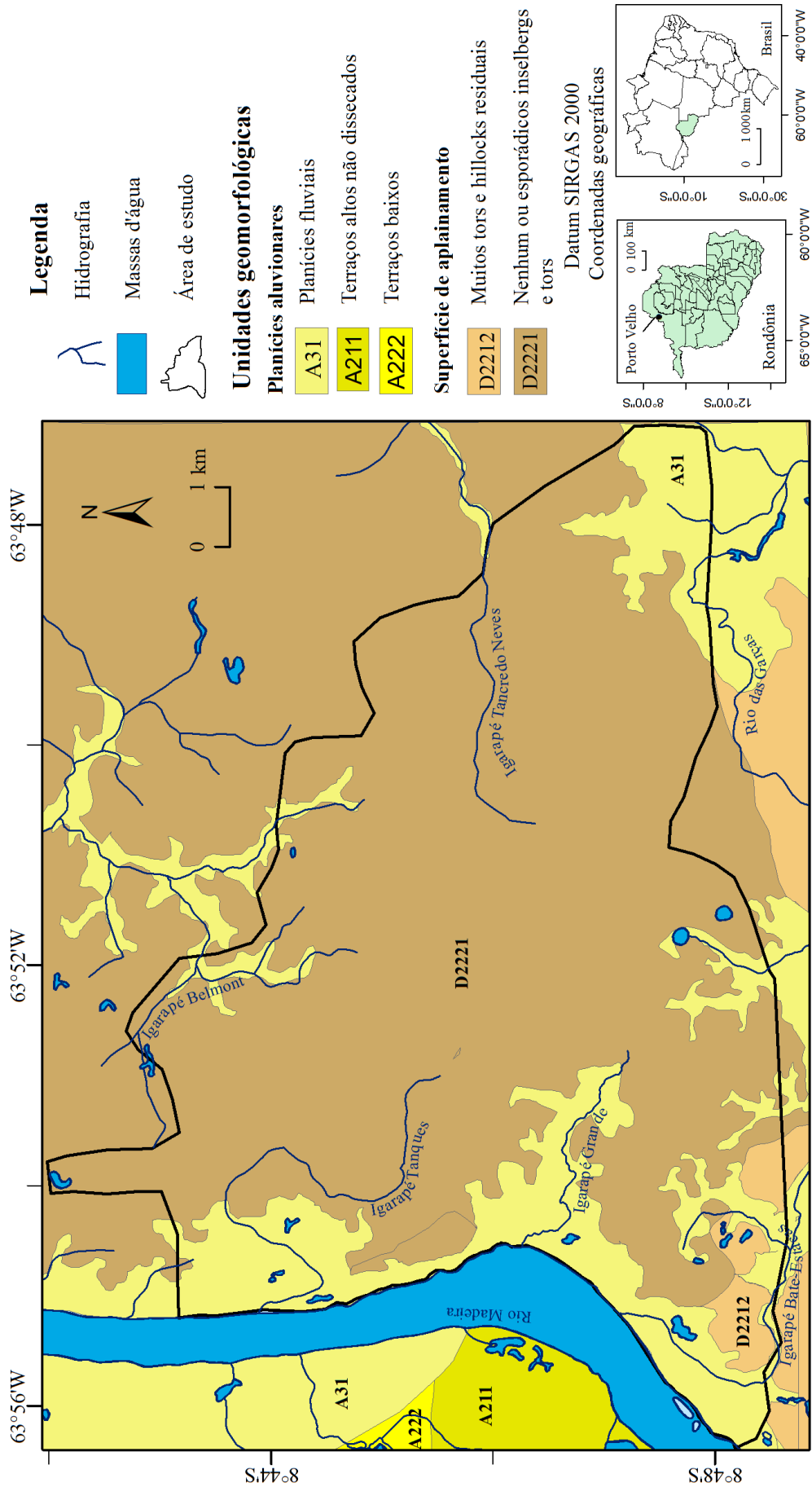


Figura 10 - Mapa de geomorfologia da área de estudo. Fonte: modificada de Rondônia (1999).



### 1.5.2 Superfície de aplainamento

#### a) Nível II com dissecação baixa e muitos tors e hillocks residuais

Esta unidade se restringe as porções do terreno localizadas no quadrante sudoeste da área de estudo com cotas inferiores a 110 metros. Apresentam dissecação baixa, resultando em muitos tors ou hillocks residuais (RONDÔNIA, 1999). As unidades geológicas correspondentes a essas superfícies de aplanamento pertencem ao Embasamento Proterozoico aflorante (Suíte Intrusiva Santo Antônio).

#### b) Nível II com dissecação média e nenhum ou esporádicos inselbergs e tors

É a unidade geomorfológica mais abrangente da área de estudo e exibe dissecação média e declividade inferior a 1% com escoamento superficial laminar. Sua gênese está relacionada com interflúvios tabulares, vales amplos e latossolos associados (RONDÔNIA, 1999). Apresenta sedimentos inconsolidados que correspondem à unidade geológica Cobertura Sedimentar Indiferenciada, além de material laterítico das zonas incoesa e argilosa vermelha/mosqueada. Os inselbergs e tors (esporádicos) estão representados pelos materiais lateríticos da zona coesa.

## 1.6 SOLOS

Na área de estudo ocorrem solos das classes Glei e Latossolos vermelho-amarelo (RONDÔNIA, 1999), ambos do grupo distróficos, segundo o Sistema de Brasileiro de Classificação de Solos (CAMARGO et al., 1987), **Figura 11**.

### 1.6.1 Gleissolos distróficos

São solos com alto teor de argila, com declividade até 2% e saturados em água, ou seja, são mal drenados. Os solos Glei localizam-se nas proximidades do rio Madeira, porção noroeste da área de estudo.

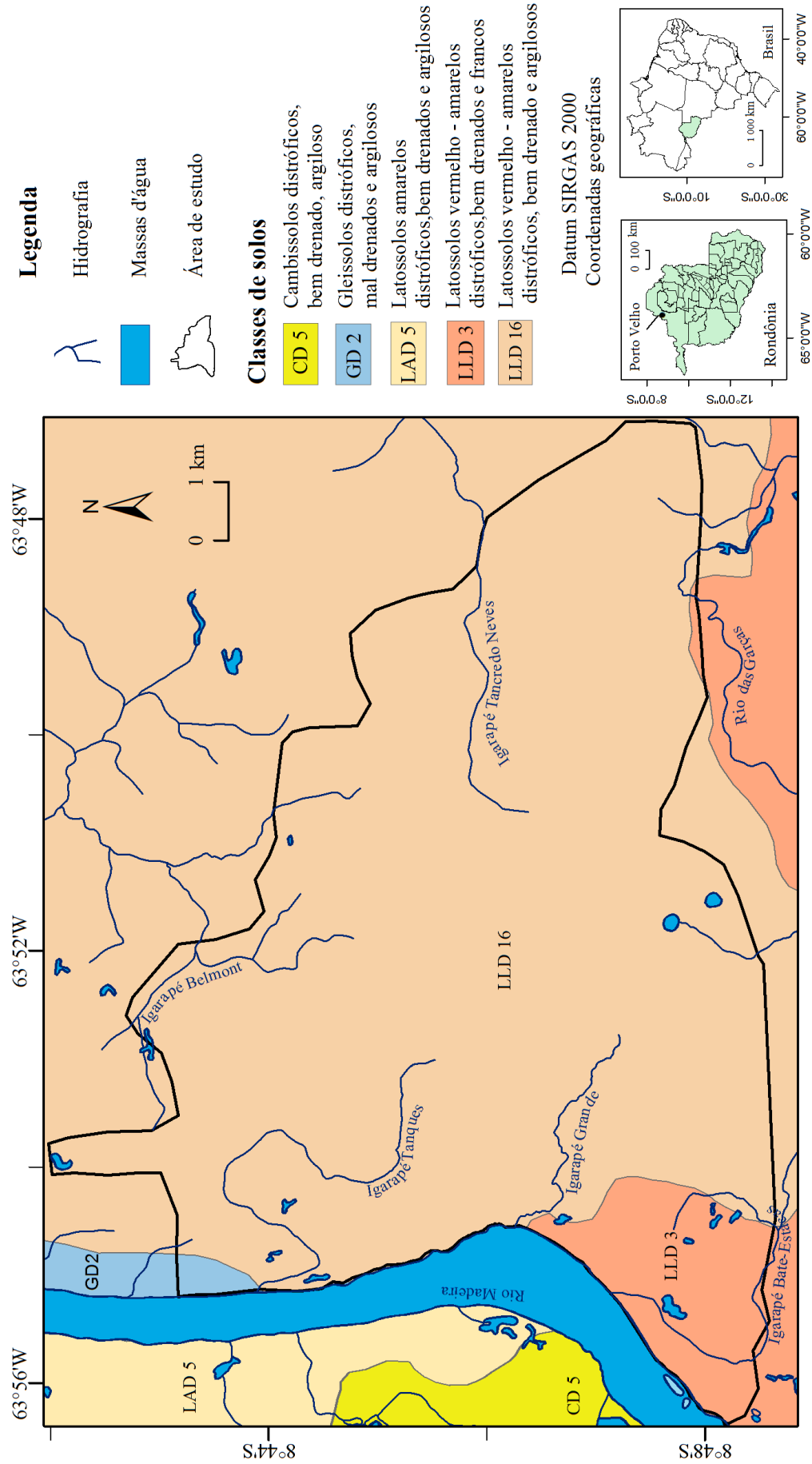
### 1.6.2 Latossolos vermelho – amarelos distróficos

Esta classe de solo predomina no estado (46%). Na área de estudo, ela perfaz quase 100%, ocorrendo como solos bem drenados e separados em duas subordens, de acordo com a declividade e classificação textural do Departamento de Agronomia dos Estados Unidos

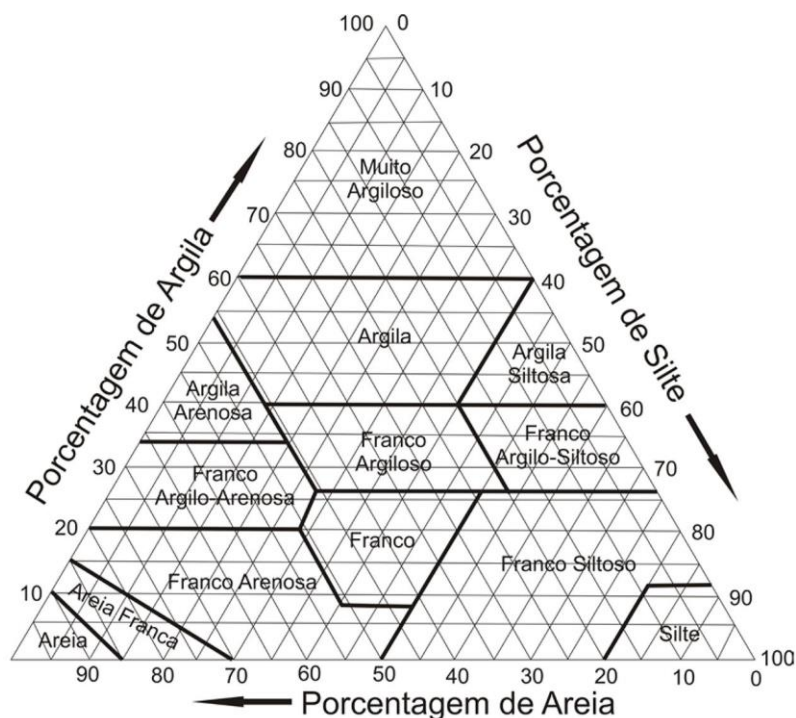


(USDA), como mostra a **Figura 12**, modificada por Lemos e Santos (1996), com a inserção da classe “muito argiloso”. A primeira subordem refere-se às áreas com declividades de 2 a 8% e é representada por latossolos de textura franco, ou seja, possuem areia, silte e argila em sua composição; e a segunda ocorre em áreas mais planas, com declividades de 0 a 2% e apresentam uma textura argilosa.

Figura 11 - Mapa de solos da área de estudo. Fonte: Rondônia (1999).



**Figura 12** - Classificação textural de solos. Fonte: Lemos e Santos (1996).



## 1.7 GEOLOGIA

O substrato proterozoico sobre o qual se desenvolveram os depósitos sedimentares e o material laterítico no Cenozoico, está representado por granitoides pertencentes à Suíte Intrusiva Serra da Providência, com idade de 1,55 bilhões de anos (BETTENCOURT et al., 1999) e pela Suíte Intrusiva Santo Antônio, com idade de 1,3 bilhões de anos (RIZZOTTO et al., 2005), conforme o mapa da **Figura 13**.

### 1.7.1 Embasamento proterozoico

#### a) Suíte Intrusiva Providência

Apesar das rochas desta unidade litoestratigráfica inexistirem em superfície, na área de estudo elas representam embasamento proterozoico na seção geológica da **Figura 12**. São constituídas por granitoides de granulação média a grossa e contemplam as fácies biotita sienogranito, hornblenda-biotita sienogranito, biotita monzogranito com titanita, titanita-hornblenda-biotita monzogranito e textura rapakivi, do tipo A e máficas pós-orogênicas (LEAL et al., 1976; BETTENCOURT et al., 1999; RIZZOTTO et al., 2005). São rochas com fraturas conjugadas fechadas N50E e foliações incipientes até milonitos bandados devido a transpressão NNW sinistral (OLIVEIRA, 2013).

## b) Suíte Intrusiva Santo Antônio

Payolla (1994) atribuiu o nome Suíte Intrusiva Santo Antônio pelo fato de ser constituída por três fácies de granitoides: biotita monzogranito grosso (textura *rapakivi* e *anti-rapakivi*), biotita monzogranito médio e quartzo monzonito. Contudo, há presença de xenólitos caracterizando-a como intrusiva. Esta Suíte forma um batólito com afloramentos restritos localizados próximos à margem do rio Madeira (QUADROS; RIZZOTTO, 2007), sudoeste da área de estudo.

### 1.7.2 Cobertura cenozoica

#### a) Materiais lateríticos

As lateritas de natureza imatura e ferruginosa desenvolveram-se na área urbana de Porto Velho como indicativos de paleosuperfícies intensamente drenadas sendo, ora bastante resistentes ao intemperismo, ora desmanteladas como consequência das condições climáticas subatuais e atuais. Apresentam perfis incompletos de diferenciação supergênica com partes do horizonte ferruginoso e suas zonas coesa e incoesa, e/ou partes do horizonte argiloso com suas zonas argilosa vermelha e mosqueada (NASCIMENTO et al., 2012).

Dados detalhados com relação aos materiais lateríticos da cidade de Porto Velho e proximidade são mostrados em Nascimento (2012), como segue: os materiais lateríticos da zona coesa possuem baixa densidade, com abundância de estrutura vesicular, poros e paleocondutos de raízes. Seu desmantelamento (zona incoesa) proporcionou a geração predominante de grãos nas frações seixo e grânulo envoltos por argila, com descontinuidade no padrão de distribuição granulométrico que separa a matriz argilosa dos grãos das frações seixo e grânulo, bem como uma gradual redução dos tamanhos dos grãos de 4 a 0,062 mm de diâmetro. Sua fração areia mostra a predominância de grãos de laterito, tendo o quartzo e os nódulos de caulinita completando sua composição modal. O material do horizonte argiloso, mesmo possuindo um predomínio da fração argila, apresenta quantidades até 40% de grãos na fração areia, tanto na zona argilosa vermelha quanto na mosqueada. A zona argilosa vermelha encontra-se em parte exposta ou abaixo da zona incoesa/coesa (**Figura 14**), com espessuras superiores a 3 metros. A zona mosqueada localiza-se abaixo da zona argilosa vermelha, com espessura de pelo menos 7 metros, sendo identificadas protocolumnas descontínuas e verticalizadas. São materiais caracterizados por manchas ferruginosas vermelhas centimétricas e irregulares (hematita e goethita), dispersas em uma matriz argilosa esbranquiçada a amarelada (caulinita e gibbsita).

Atualmente, os materiais lateríticos da área de estudo estão sob efeito de intenso intemperismo químico, ou seja, sua exposição ao clima atual proporciona uma situação instável e em processo de eluviação. São saprólitos constituídos por um material argiloso, com relictos de fragmentos ferruginosos de espessura de até 1 metro. Por outro lado, podem estar cobertos por materiais depositados pela gravidade (colúvios) ou pela dinâmica fluvial atual a subatual do rio Madeira e seus afluentes (depósitos aluvionares), referentes aos sedimentos cenozoicos.

Os materiais lateríticos desempenham papel importante na configuração do relevo local e regional, com feições geomorfológicas da zona aflorante. As formas de relevo mais exuberantes estão associadas aos lateritos (zona coesa) em função de sua relativa resistência a processos intempéricos atuais. O desenvolvimento de superfícies rebaixadas nas áreas que ocorrem lateritos está associado à paisagem onde afloram materiais ricos em argila (horizonte argiloso) e lateritos dismantelados (zona incoesa).

#### b) Sedimentos

O registro sedimentar da área urbana de Porto Velho refere-se ao reflexo das variações da dinâmica de seu sistema fluvial no Cenozoico, dando origem às unidades geológicas constituídas por sedimentos plio-pleistocênicos de difícil individualização (QUADROS; RIZZOTTO, 2007), denominada de Cobertura sedimentar indiferenciada, além de Depósitos aluvionares atuais e subatuais (SCANDOLARA, 1999).

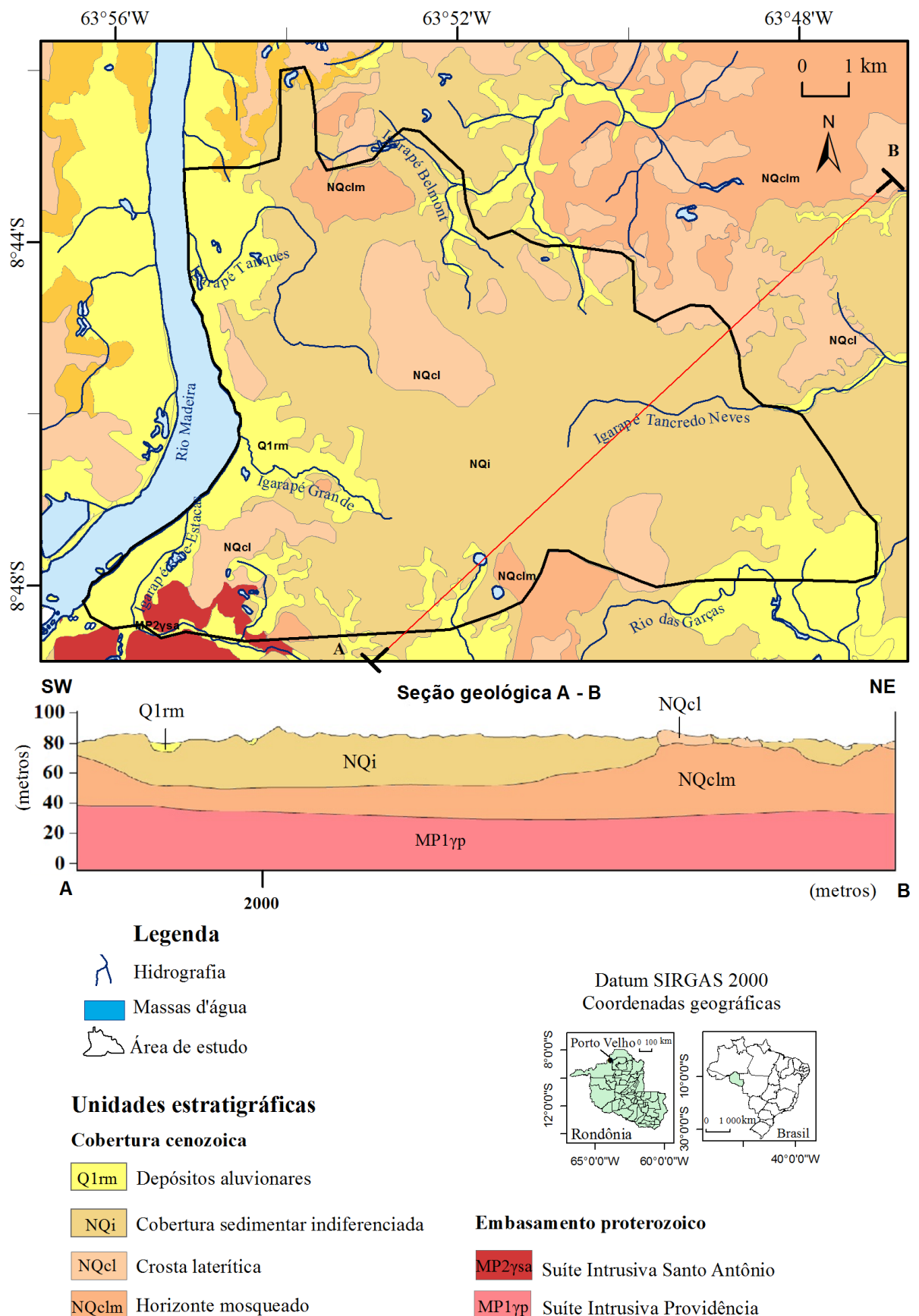
##### - Cobertura sedimentar indiferenciada

A cobertura sedimentar indiferenciada é a unidade que predomina na área de estudo e foi primeiramente descrita por Scandolara (1999) como sedimentos que ocorrem na margem direita do rio Madeira, com grãos desde a fração cascalho até argila, relacionados a ambientes aluviais, canais fluviais, planícies de inundação e lacustres. Quadros e Rizzotto (2007) afirmaram que a unidade possui espessura inferior a 40 metros, desprovida de fósseis, e seus sedimentos foram datados do Plio-Pleistoceno. Oliveira (2013) mencionou que esta unidade é caracterizada por uma superfície aplainada e possui um alto grau de ferruginização. Adamy e Romanini (1990) descreveram sedimentos desta unidade designando-a como Formação Jaci-Paraná. No entanto, para Quadros e Rizzotto (2007), a Formação Jaci-Paraná restringe-se à margem esquerda do rio Madeira, limitada pela foz do rio São Lourenço e pela serra Três Irmãos, nas duas margens do rio Jaci-Paraná e à jusante da cachoeira de Jirau.

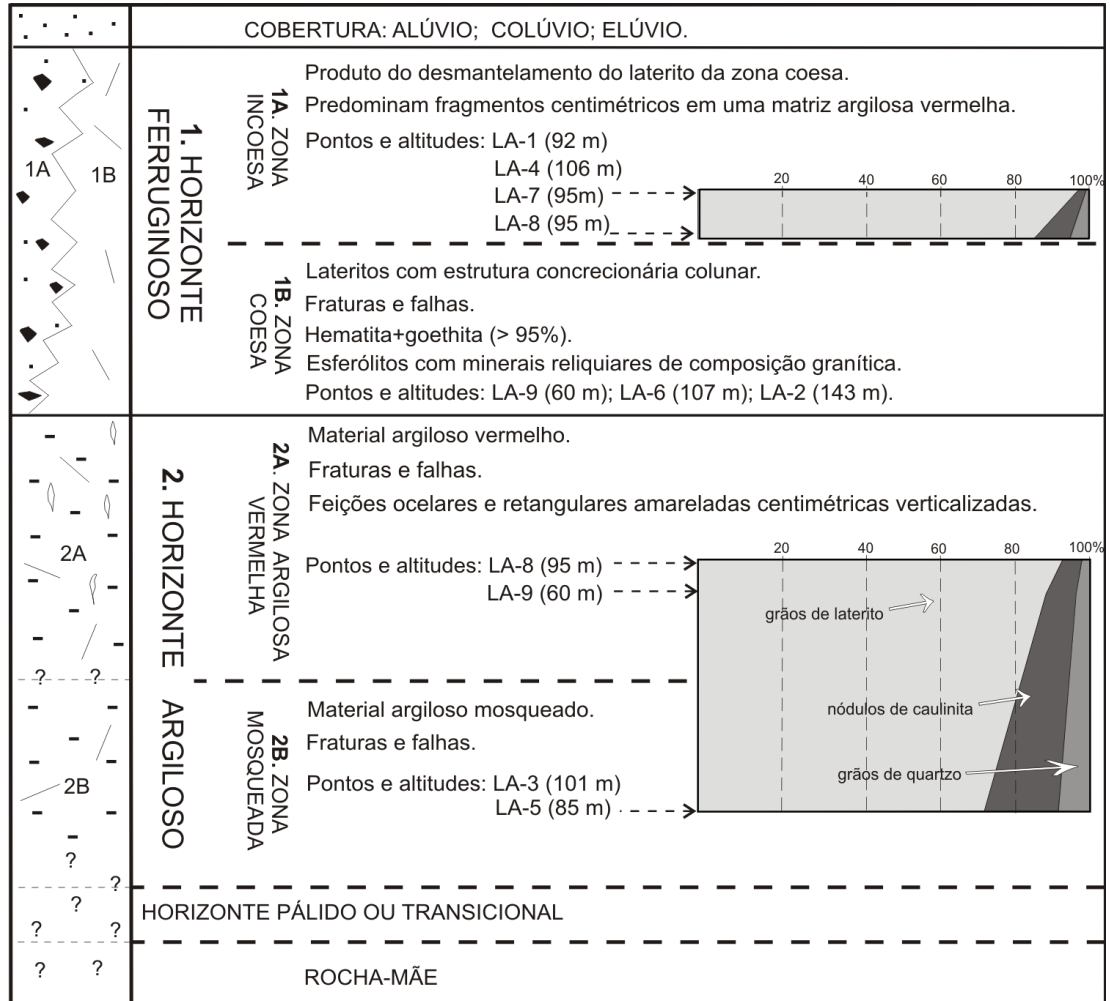
- Depósitos aluvionares

Os depósitos aluvionares compreendem os sedimentos inconsolidados nos leitos e margens dos canais fluviais atuais, caracterizados notadamente na calha do rio Madeira, além de depósitos de menor envergadura nos seus afluentes. No rio Madeira, são destacados por estarem associados à formação de ilhas e barras arenosas em locais favoráveis a sua deposição. Em canais, são compostos por areias grossas e cascalhos de granulometria variável. Considerando a sazonalidade das estações, verifica-se que no período das cheias ocorre extensa sedimentação nas planícies de inundação, constituídas por siltes e argilas, além das areias silto-argilosas nos diques marginais (QUADROS; RIZZOTTO, 2007).

**Figura 13** - Mapa geológico da área de estudo, Porto Velho (RO). Fonte: modificada de Oliveira (2013).



**Figura 14** - Perfil estratigráfico esquemático das ocorrências de materiais lateríticos da área de estudo e distribuição mineralógica no intervalo granulométrico entre 64 e 0,062 mm. Fonte: Nascimento (2012).





## 2 HIDROGEOLOGIA E HIDROGEOQUÍMICA

A hidrogeologia como o estudo do comportamento da água quanto a sua ocorrência, movimentação, distribuição e à interação geológica (HISCOCK, 2005), vem possibilitar a previsão de impactos da super-exploração dos recursos hídricos por meio de cálculos de recarga e reserva. Quanto à hidrogeoquímica, abrange estudos da composição das águas subterrâneas e suas alterações naturais e antrópicas resultantes da interação com o meio (FEITOSA et al., 2008).

### 2.1 ELEMENTOS DO CICLO HIDROLÓGICO

O planeta Terra, por ser considerado um sistema fechado, troca apenas energia com o meio externo. Por consequência, a água, tanto no estado líquido, sólido, gasoso ou vapor, permanece no sistema e circula em diferentes meios até completar o ciclo hidrológico (**Figura 15**).

A água evapora dos oceanos, rios, lagos e plantas para a atmosfera através da radiação. Após sua condensação e precipitação, uma parte escoar na superfície da Terra e a outra infiltra na zona vadosa ou zona não saturada. Na zona vadosa, a água é absorvida pela vegetação e retorna à atmosfera por evapotranspiração. Outra parcela percola até as porções mais profundas em direção aos aquíferos atingindo os rios, lagos e oceanos, continuando o ciclo hidrológico (HISCOCK, 2005).

Cerca de 97,5% da água do planeta é salgada e encontra-se nos oceanos. Compõe as geleiras 1,7%, e apenas 0,8% desse percentual está acessível para o consumo (BRASIL, 2007b). Aproximadamente 96% dessa água disponível para exploração encontra-se nos aquíferos e os 4% restantes estão distribuídos em lagos, reservatórios, rios e na forma de chuva (**Figura 16**).

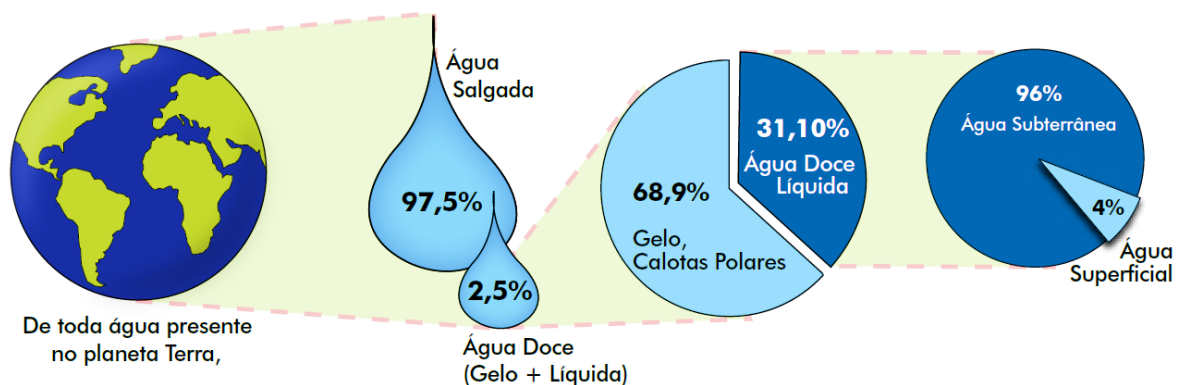
### 2.2 RECARGA E DESCARGA

A região amazônica, por possuir um alto índice de precipitação pluviométrica, abastece os rios, igarapés e lagos pelo escoamento superficial. Já os aquíferos se abastecem pela água pluvial percolada nos poros dos solos e sedimentos ou nas fraturas das rochas. Posteriormente, a água armazenada e transportada dos aquíferos irá abastecer, inclusive, os corpos d'água superficiais por meio de suas áreas de descargas como as nascentes, por exemplo.

**Figura 15** - Ciclo hidrológico. Fonte: USGS (1879).



**Figura 16** - Distribuição da água doce e salgada no planeta. Fonte: Brasil (2007b).



### 2.2.1 Recargas

As áreas de recarga estão geralmente associadas ao nível estático mais profundo, cotas topográficas e potenciométricas mais elevadas, onde há permeabilidade mínima para infiltração da água.

Fetter (2001) diz que certos materiais de menor permeabilidade podem dificultar a passagem da água até o aquífero, como ocorre em delgadas camadas de argila e/ou silte, por exemplo, denominados aquitardos. Nesse caso, os aquíferos são denominados semiconfinados, pois são abastecidos indiretamente pelo aquitardo. Os aquíferos livres são

recarregados diretamente pela água da chuva e os confinados pelas áreas permeáveis aflorantes.

A recarga, influenciada pela condutividade hidráulica do material que a compõe, depende da permeabilidade e grau de saturação dos sedimentos e das rochas. A condutividade hidráulica se torna maior quanto maior for o volume de água nos interstícios do substrato, porém, menor será o potencial de umidade (FETTER, 2001). A percolação da água no subsolo é auxiliada pela gravidade, todavia, é necessário que haja quantidade suficiente de água para superar a capilaridade (VAITSMAN; VAITSMAN, 2005). O tempo de inserção da água meteórica no substrato não está relacionado apenas com o grau de saturação em água da zona vadosa, mas com sua espessura. Outros fatores que contribuem para a infiltração da água no substrato, de acordo com Fetter (2001), estão relacionados à superfície do terreno, visto que as superfícies mais planas favorecem a recarga e são reconhecidas em mapas de fluxo subterrâneo pelo sentido de fluxo divergente.

A vegetação representa, igualmente, outra condicionante importante para a manutenção dos aquíferos, pois é responsável por facilitar a percolação da água por meio da desagregação do substrato. Ademais, conforme Vaitsman e Vaitsman (2005), ela contribui para o processo de formação de chuvas e é capaz de reter sais minerais que possam vir a comprometer a qualidade da água.

Por isso, é indicado que se conserve a vegetação nas áreas de recarga, através da determinação de zonas de conservação, pois é a partir delas que os aquíferos podem ser abastecidos e a qualidade de suas águas preservadas.

#### a) Método da Flutuação da Superfície Piezométrica

O volume de água que abastece os aquíferos configura uma das importantes informações para gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. A quantificação da recarga requer a análise e o acompanhamento de dados referentes a variáveis diretas que compõem o ciclo hidrológico (precipitação, evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial) e quanto maior o número de informações, maior será o seu detalhamento. Contudo, existem variáveis indiretas de difícil mensuração e que podem implicar na variação da contabilização real da recarga. Ao estudar um ambiente urbano, Lerner (1990) identificou variáveis indiretas e relacionou-as com atividades antrópicas como, por exemplo, vazamentos nas tubulações de drenagem pluvial, nas adutoras da rede de abastecimento de água, na rede

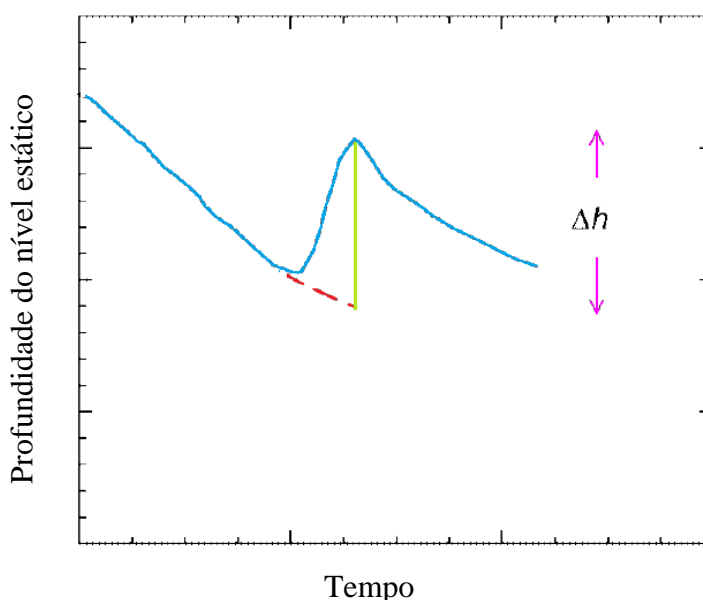
de esgoto e fossas sépticas, além da irrigação de parques e contribuição de rios considerando o grande volume de água despejado em épocas de enchente.

Existem muitos métodos para se estimar a recarga do aquífero como, o método do balanço hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1948), que é mais direto e requer poucos dados (temperatura e precipitação). Contudo, este método indica o valor de recarga bruta, ou seja, o somatório da quantidade de água que infiltra no subsolo (recarga líquida) com a água “perdida” pelo escoamento superficial, ocasionado pela saturação do solo. O método da flutuação da superfície piezométrica - *Water Table Fluctuation* – WTF (HEALY; COOK, 2002) indica a recarga líquida do aquífero e requer dados da variação do nível d’água por um determinado tempo.

O método de flutuação da superfície piezométrica (WTF – *Water Table Fluctuation*), descrito por Healy e Cook (2002), é aplicado em aquíferos não confinados e visa à obtenção da recarga do aquífero em um período determinado (horas, dias, meses ou anos).

Tendo em vista o método WTF, primeiramente deve ser obtida a variação total do nível estático para o tempo analisado. Para isso, é necessária a construção do gráfico de nível estático pelo tempo de sua variação (**Figura 17**).

**Figura 17** - Representação hipotética da subida no nível estático em resposta à precipitação. Fonte: Healy e Cook (2002).



Na porção descendente da linha da superfície freática do gráfico da **Figura 16**, delineia-se a curva de recessão que representa a tendência da superfície potenciométrica, caso o aquífero não fosse recarregado. A curva de recessão deve ser prolongada até interceptar a

reta traçada desde o ponto máximo do nível estático, assim, o comprimento da reta entre o pico até a intercepção da curva de recessão resultará na variação do nível freático para o período analisado. Este procedimento deve ser repetido conforme a quantidade de dados disponíveis, isto é, quanto menor o intervalo de tempo entre as medições do nível estático e maior o tempo de acompanhamento desta variação, maior será a precisão do resultado buscado. Ao fim, para se obter a variação do nível estático total, somam-se todas as variações de nível estático ocorridas para o tempo analisado. Em seguida, determina-se o rendimento específico ( $S_y$ ) e calcula-se a recarga por meio da **Equação 1**.

$$R = S_y \cdot \Delta h / \Delta t$$

**Equação 1**

R – Recarga (mm/ano);  $S_y$  – rendimento específico (adimensional); h – altura do nível d'água subterrâneo (m); t – tempo (ano).

### 2.2.2 Descargas

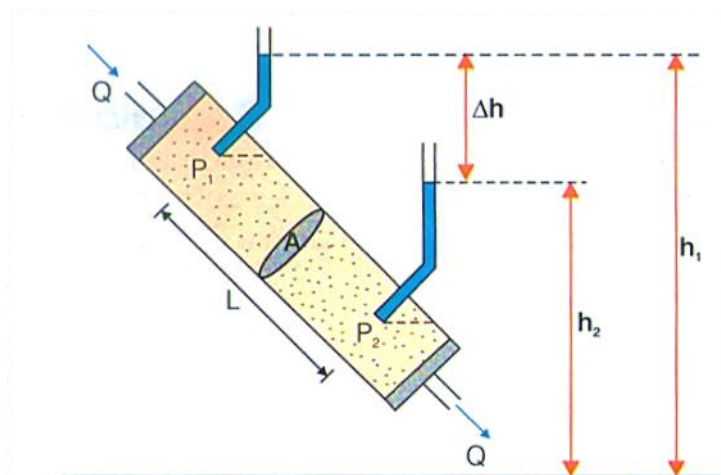
São áreas onde ocorre a saída de água subterrânea por um determinado tempo, como é o caso das nascentes d'água (CUSTODIO; LLAMAS, 1976). Para Fetter (2001), são áreas que se situam em cotas menos elevadas e geralmente próximas às drenagens, visto que o nível estático local é pouco profundo e podem ser identificadas em mapas de fluxo pela convergência do sentido de fluxo subterrâneo.

## 2.3 PROPRIEDADES DO AQUÍFERO

A dinâmica da água subterrânea depende das propriedades hidráulicas do meio (solo, sedimento ou rocha) e foi estudada por Henry Darcy, em 1856. Por meio de experimentos, ele determinou a velocidade ou vazão de escoamento do fluido em um meio arenoso não saturado (**Figura 18**).

O referido autor concluiu que a vazão de escoamento ( $Q$ ) é diretamente proporcional à carga hidráulica entre dois pontos ( $\Delta h$ ) à área por onde passam fluidos ( $A$ ), ao coeficiente de permeabilidade ou à condutividade hidráulica ( $K$ ), e inversamente proporcional à distância ( $L$ ) entre os dois pontos adotados (FEITOSA et al., 2008). Para indicar o sentido do fluxo decrescente foi inserido o sinal negativo na equação denominada “Lei de Darcy” (**Equação 2**) (HISCOCK, 2005).

**Figura 18** - Experimento de Darcy. Fonte: Feitosa et al. (2008).



$$Q = - K.A.(\Delta h/L)$$

**Equação 2**

Q – Vazão (m<sup>3</sup>/h); K- Condutividade hidráulica (m/h); A – Área de seção transversal do cilindro (m<sup>2</sup>); Δh – variação da carga hidráulica entre os dois piezômetros (m); L – distância entre os dois piezômetros (m).

A relação entre (Δh/L) define o gradiente hidráulico (i), conforme a **Equação 3** (FETTER, 2001; FEITOSA et al. (2008)). O gradiente hidráulico indica a declividade do nível de água (adimensional) em que elevados gradientes hidráulicos sugerem uma superfície potenciométrica bem inclinada. Já os menores implicam em uma superfície potenciométrica tendendo à horizontalidade, ou seja, pode-se supor que o terreno é mais plano.

$$i = \Delta h/L$$

**Equação 3**

i – gradiente hidráulico (adimensional); Δh – variação da carga hidráulica entre os dois piezômetros (m); L – distância entre os dois piezômetros (m).

Logo, outra forma de representar a Lei de Darcy é pela **Equação 4**.

$$Q = - K.A.i$$

**Equação 4**

Q – Vazão (m<sup>3</sup>/h); K- Condutividade hidráulica (m/h); A – Área de seção transversal do cilindro (m<sup>2</sup>); i – gradiente hidráulico (adimensional);

### 2.3.1 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica ( $K$ ), expressa em cm/s ou m/dia, indica a facilidade do aquífero em transmitir água por uma seção unitária em um determinado tempo. Ela depende das características do meio como porosidade, tamanho, distribuição do material e do tipo de fluido em que se encontra (FEITOSA et al., 2008). De acordo com a **Equação 5**, a condutividade hidráulica é diretamente proporcional à da permeabilidade intrínseca ( $K_i$ ), densidade específica do fluido ( $\gamma$ ) e inversamente proporcional à viscosidade ( $\mu$ ), conforme Fetter (2001).

$$K = K_i \cdot (\gamma)/\mu$$

**Equação 5**

$K$ - Condutividade hidráulica (cm/s);  $K_i$  - permeabilidade intrínseca;  $\gamma$  - densidade específica do fluido;  $\mu$  - viscosidade.

A condutividade hidráulica pode ser obtida a partir da utilização de métodos adequados conforme os dados dos poços disponíveis (teste de bombeamento com ou sem poços de observação e penetratividade e estacionário ou transiente) e, principalmente, pelo tipo aquífero (**Figura 19**).

**Figura 19** - Quadro relacionando os métodos para cálculos de condutividade hidráulica conforme o tipo de aquífero. Fonte: Kruseman e Ridder (1991).

Tipo de Aquífero	Confinado	Semiconfinado	Livre
Métodos	Thiem - 1906 Theiss - 1935 Cooper e Jacob - 1946	De Glee - 1930, 1951, 1964 Hantush - Jacob – 1955 Hantush - 1956 Walton - 1962 Neuman e Witherspoon - 1972	Thiem e Dupuit - 1906 Neuman - 1972

#### a) Método do ponto de inflexão de Hantush

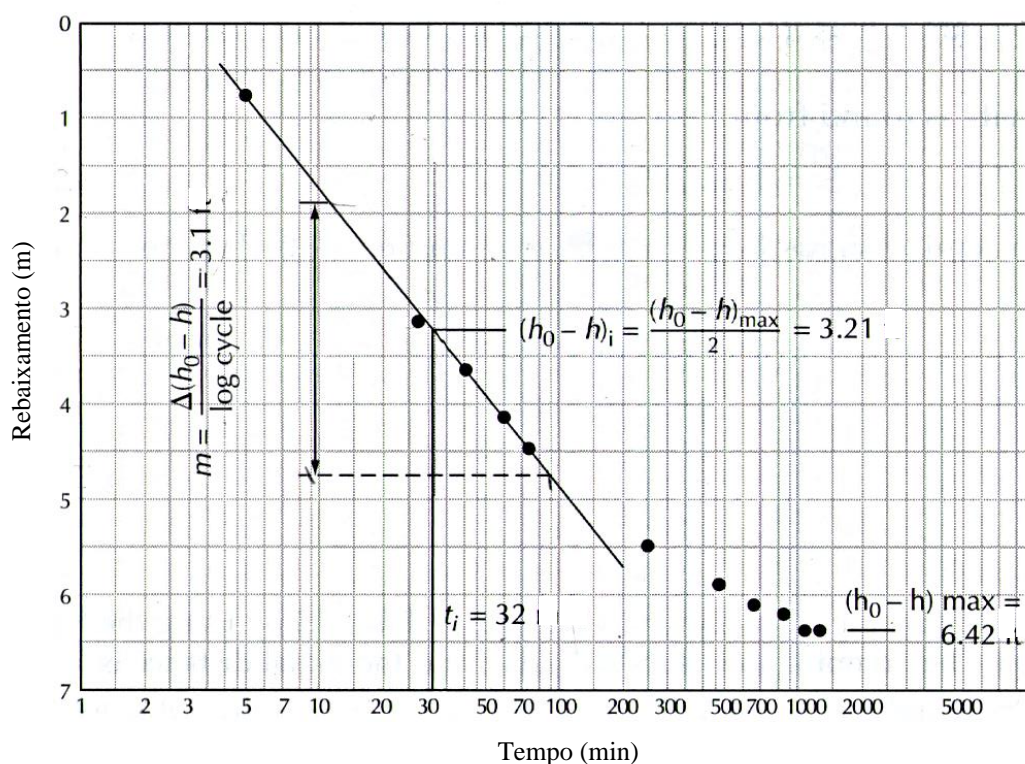
A condutividade hidráulica para aquíferos confinados drenantes (semiconfinados) pode ser mensurada pelo método do ponto de inflexão de Hantush (1956). Este método requer dados do teste de bombeamento, sem poços de observação. Os procedimentos para seu



desenvolvimento são (KRUSEMAN; RIDDER, 1991; FETTER, 2001; FEITOSA et al., 2008):

- construir a reta de rebaixamento pelo tempo no gráfico semilog (**Figura 20**);
- determinar o rebaixamento máximo  $(h_0 - h)_{\text{máx}}$ ;
- estabelecer o rebaixamento referente ao ponto de inflexão  $(h_0 - h)_i$  que representa metade do rebaixamento máximo e o seu tempo  $(t_i)$ ;
- obter o declive da reta  $(m_i)$  referente ao rebaixamento de um ciclo logarítmico;
- calcular a função  $f(r/B)$  pela **Equação 6** para obter o  $k_0(r/B)$  correspondente no ábaco estabelecido por Hantush (1956); e
- calcular a transmissividade (T) pela **Equação 7**, a partir da vazão, e a condutividade pela **Equação 8**.

**Figura 20** – Representação do rebaixamento pelo tempo no gráfico semilog. Fonte: Fetter (2001).



$$f(r/B) = [2,3 (h_0 - h)_i] / m_i$$

**Equação 6**

$$T = (Q) / 2\pi (h_0 - h)_{\text{máx}}$$

**Equação 7**

$$K = T \cdot b$$

**Equação 8**



### 2.3.2 Permeabilidade intrínseca

A permeabilidade intrínseca ( $K_i$ ) é uma constante ( $\text{cm}^2$ ,  $\text{m}^2$  ou darcys) que representa as propriedades do meio poroso pois depende do tamanho da abertura entre os poros ( $\text{cm}^2$ ) e do seu arranjo por onde os fluídos se movem, visto que independe das propriedades do fluído (FETTER, 2001). Segundo o autor, é diretamente proporcional ao fator adimensional da forma dos grãos ( $C$ ) e do diâmetro médio dos grãos ( $d$ ), expressa pela **Equação 9**.

$$K_i = C \cdot d^2$$

**Equação 9**

$K_i$  - permeabilidade intrínseca ( $\text{cm}^2$ );  $C$  – constante (adimensional);  $d$ - diâmetro médio dos grãos de areia (cm).

Fetter observou que a diminuição do tamanho dos grãos diminui a permeabilidade intrínseca, dado que decorre no aumento da resistência de fricção, ou seja, o aumento da granulação do grão implica no aumento da abertura dos poros, o qual é diretamente proporcional à condutividade hidráulica e à permeabilidade intrínseca de sedimentos inconsolidados (**Figura 21**).

**Figura 21** - Quadro com a relação dos valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica de sedimentos inconsolidados. Fonte: Fetter (2001).

Material	Permeabilidade Intrínseca ( $\text{cm}^2$ )	Condutividade Hidráulica ( $\text{cm/s}$ )
Argila	$10^{-14} - 10^{-11}$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso; Areia argilosa	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia siltosa; Areia fina	$10^{-10} - 10^{-8}$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem distribuída	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho bem distribuído	$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^{-2} - 10^0$

### 2.3.3 Porosidade

A porosidade ( $\phi$ ) representa a relação percentual do volume de espaços vazios ( $V_v$ ) contidos em um volume total ( $V_t$ ) e é expressa pela **Equação 10** ( GIAMPÁ; GONÇALES, 2006).

$$\phi = 100 (V_v / V_t)$$

**Equação 10**

$\phi$  - porosidade (percentual);  $V_v$  - volume de espaços vazios;  $V_t$  – volume total.

### 2.3.4 Rendimento e retenção específica

Parte da água que é aderida na superfície dos grãos à conta da tensão superficial e à capilaridade é denominada de retenção específica ( $S_r$ ). Por outro lado, a quantidade de água que escoar no aquífero é denominada rendimento específico ( $S_y$ ), expresso pela **Equação 11** (MEIZER, 1923). A **Figura 22** mostra a relação entre o rendimento específico ( $S_y$ ) e a retenção específica ( $S_r$ ), ambos adimensionais.

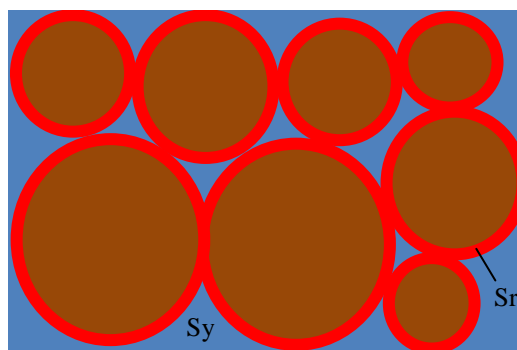
$$S_y = \phi - S_r$$

**Equação 11**

$S_y$  - rendimento específico (adimensional);  $\phi$  - porosidade;  $S_r$  – retenção específica.

Por meio de experimentos, Johnson (1967) definiu valores de  $S_y$  para diferentes materiais e constatou que os maiores valores de  $S_y$  estão relacionados com os sedimentos grossos, uma vez que os sedimentos mais finos tendem aos valores menores (**Figura 23**). Já Healy e Cook (2002) afirmam que sedimentos de granulação grossa tendem a drenar a água mais rapidamente que os sedimentos mais finos, em um mesmo período, devido aos maiores espaços entre as partículas.

**Figura 22** - Relação entre rendimento específico ( $S_y$ ) em azul e retenção específica ( $S_r$ ) em vermelho.



**Figura 23** - Quadro com a relação de rendimento específico ( $S_y$ ). Fonte: Johnson (1967).

Textura	Média de $S_y$	Mínimo $S_y$	Máximo $S_y$
Argila	0,02	0,00	0,05
Silte	0,08	0,03	0,19
Argila com areia	0,07	0,03	0,12
Areia fina	0,21	0,10	0,28
Areia média	0,26	0,15	0,32
Areia grossa	0,27	0,20	0,35
Areia com cascalho	0,25	0,20	0,35
Cascalho fino	0,25	0,21	0,35
Cascalho médio	0,23	0,13	0,26
Cascalho grosso	0,22	0,12	0,26

### 2.3.5 Transmissividade

A transmissividade representa a quantidade de água ( $\text{cm}^2/\text{s}$  ou  $\text{m}^2/\text{dia}$ ) que pode ser transmitida na horizontal através de uma largura unitária, por intermédio de uma faixa vertical saturada de espessura (b) (FETTER, 2001). A transmissividade depende do meio em que se encontra e do tipo de fluido e está relacionada com a condutividade hidráulica (K), ou seja, é o produto da condutividade hidráulica pela espessura da camada saturada, conforme mostra a **Equação 12**.

$$T = K.b$$

**Equação 12**

T – transmissividade ( $\text{m}^2/\text{s}$ ); K - condutividade hidráulica ( $\text{m/s}$ ); b – espessura da camada saturada (m).

## 2.4 PRODUTIVIDADE

Mensurar a produtividade do aquífero é importante para definir os locais mais viáveis à exploração da água subterrânea. O fornecimento de água de um aquífero está diretamente ligado às suas características físicas, como transmissividade e condutividade hidráulica, por exemplo. Diniz et al. (2012) propuseram a classificação de produtividade com base em intervalos de vazão específica, transmissividade, condutividade hidráulica e vazão (**Figura 24**). Esses dados são válidos para testes de 12 horas e rebaixamento de até 25 metros. Eles dividiram a produtividade em 6 classes de produtividade: muito alta, alta, moderada, geralmente baixa, porém localmente moderada, geralmente baixa, mas localmente muito baixa e pouco produtiva ou não aquífera.

**Figura 24** - Quadro com a classificação de produtividade. Fonte: Diniz et al. (2012).

Vazão específica Q/s (m <sup>3</sup> /h/m)*	Transmissividade T (m <sup>2</sup> /s)	Condutividade hidráulica K (m/s)	Vazão Q (m <sup>3</sup> /h)	Produtividade
$Q/s \geq 4,0$	$T \geq 10^{-2}$	$K \geq 10^{-4}$	$Q \geq 100$	<b>Muito alta:</b> fornecimento de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destacam em âmbito nacional
$2 \leq Q/s < 4$	$10^{-3} \leq T < 10^{-2}$	$10^{-5} \leq K < 10^{-4}$	$50 \leq Q < 100$	<b>Alta:</b> características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos
$1 \leq Q/s < 2$	$10^{-4} \leq T < 10^{-3}$	$10^{-6} \leq K < 10^{-5}$	$25 \leq Q < 50$	<b>Moderada:</b> fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades e irrigações em áreas restritas
$0,4 \leq Q/s < 1$	$10^{-5} \leq T < 10^{-4}$	$10^{-7} \leq K < 10^{-6}$	$10 \leq Q < 25$	<b>Geralmente baixa, porém localmente moderada:</b> fornecimento de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado
$0,04 \leq Q/s < 0,4$	$10^{-6} \leq T < 10^{-5}$	$10^{-8} \leq K < 10^{-7}$	$1 \leq Q < 10$	<b>Geralmente baixa, porém localmente muito baixa:</b> fornecimento contínuo dificilmente é garantido
$Q/s < 0,04$	$T < 10^{-6}$	$K < 10^{-8}$	$Q < 1$	<b>Pouco produtivo ou não aquífero:</b> fornecimento insignificante de água

## 2.5 AQUÍFEROS

Uma camada ou uma sequência de camadas de rocha ou sedimentos que contenham e transmitam quantidades significativas de água são denominadas aquíferos (HISCOCK, 2005). Os materiais geológicos que constituem os aquíferos podem ser sedimentos inconsolidados ou rochas fraturadas que compreendem uma ou mais unidades geológicas. Fetter (2001) versa que a permeabilidade intrínseca destas camadas é maior ou igual  $10^{-10}$  cm<sup>2</sup> e condutividade hidráulica maior que  $10^{-5}$  cm/s, o que equivale à granulação de areia fina até cascalho. Os aquíferos podem ser classificados de acordo com sua condutividade hidráulica, em: aquífero pobre ( $10^{-5}$  a  $10^{-3}$  cm/s), aquífero bom ( $10^{-3}$  a  $10^{-1}$  cm/s) e aquífero excelente ( $10^{-1}$  a  $10^{+1}$  cm/s); e as camadas ou porções de permeabilidade menor que  $10^{-5}$  cm/s são denominados aquitardos (CUSTODIO; LLAMAS, 1976).

O aquífero refere-se a uma unidade geológica que armazena pouca quantidade de água e a transmite lentamente para outras camadas aquíferas, pois tem uma permeabilidade intrínseca menor ou igual a  $10^{-10}$  cm<sup>2</sup> e com uma condutividade hidráulica menor ou igual a  $10^{-5}$  cm/s (FETTER, 2001). É composto por areia argilosa, rochas sedimentares com poucas fraturas e rochas ígneas ou metamórficas fraturadas (HISCOCK, 2005). No entanto, em termos de fluxo subterrâneo regional transmite quantidades significantes de água, mas em alguns casos pode ser economicamente inviável para ser explorado, quando composto por materiais com condutividade hidráulica inferior a  $10^{-6}$  cm/s, implicando em uma menor vazão (DINIZ et al., 2012).

Em contrapartida, existem camadas completamente impermeáveis denominadas aquíclode e aquífugo. O aquíclode representa uma unidade geológica que não transmite quantidade significativa de água, uma vez que seus poros não são conectados sob um mesmo gradiente hidráulico, como as argilas compactas e folhelhos (HISCOCK, 2005). O aquífugo refere-se a uma unidade geológica composta por rochas que não armazenam e nem transmitem água, como ocorre nas rochas ígneas e metamórficas sem fraturas (GIAMPÁ; GONÇALES, 2006).

A **Figura 25** mostra a relação entre aquífero, aquítarde, aquíclode e aquífugo, em termos de condutividade hidráulica, permeabilidade e composição granulométrica.

**Figura 25** – Quadro com a classificação do sistema armazenador pela condutividade hidráulica (cm/s) associada à granulometria e permeabilidade. Fonte: Custodio e Llamas (1976).

Condutividade hidráulica (cm/s)	$10^{-9}$ a $10^{-7}$	$10^{-7}$ a $10^{-5}$	$10^{-5}$ a $10^{-3}$	$10^{-3}$ a $10^{-1}$	$10^{-1}$ a $10^{+1}$
Permeabilidade	Impermeável	Pouco permeável	Moderadamente permeável	Permeável	Muito permeável
Classificação	Aquicludo <sup>1</sup> ou Aquifugo <sup>2</sup>	Aquitarde	Aquífero pobre	Aquífero bom	Aquífero excelente
Granulométrica	Argilas compactas <sup>1</sup> , basaltos com vesículas <sup>1</sup> , granitos sem fraturas <sup>2</sup>	Areia com argila, silte com areia, silte, argila com silte	Areia fina, areia com silte, areia com argila	Areia bem selecionada, cascalho e areia, areia fina	Cascalho bem selecionado

### 2.5.1 Tipos de aquíferos

A disposição e a presença ou ausência de camadas semipermeáveis ou impermeáveis podem caracterizar as lentes ou camadas armazenadoras e transmissoras em três tipos de aquíferos: livre, semiconfinado e confinado (**Figura 26**).

#### a) Aquífero livre

Refere-se à camada que possui porosidade e permeabilidade capaz de armazenar e transmitir água contida na zona saturada, sob condições atmosféricas. A interface entre a zona saturada e insaturada designa-se como nível estático e, comumente conhecida como “lençol freático” (GIAMPÁ; GONÇALES, 2006). Para Feitosa et al. (2008), existe um tipo especial de aquífero livre, definido por uma camada mais impermeável na base, que proporciona o acúmulo de água com extensão limitada, localizando-se entre o nível estático regional e a superfície do terreno e de caráter sazonal, denominado aquífero suspenso.

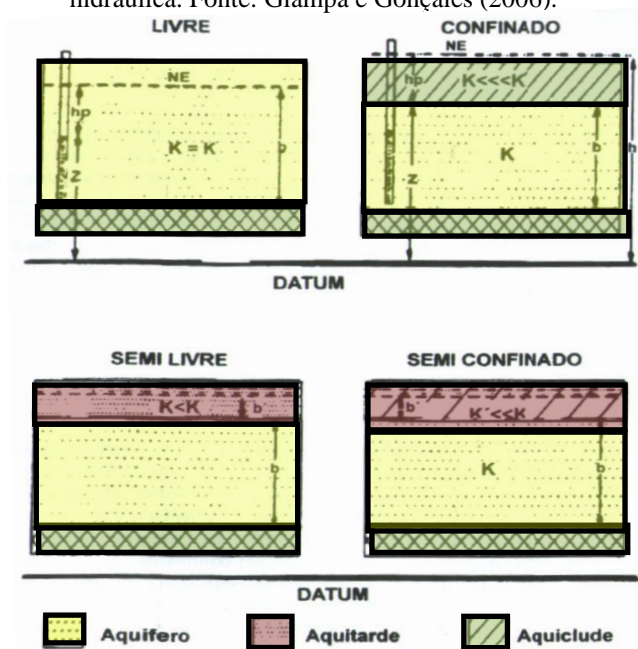
b) Aquífero semiconfinado ou confinado drenante

É designado para aquíferos que são delimitados na parte superior por um aquitarde e na parte inferior por um aquitarde ou aquiclude. O nível estático desses aquíferos localiza-se acima ou abaixo do nível freático ou pode coincidir com ele, conforme define Kruseman e Ridder (1991).

c) Aquífero confinado ou confinado não drenante

É representado por uma camada localizada entre camadas com permeabilidade ínfima. Encontra-se sob uma pressão superior da atmosfera, pois possui a pressão da camada confinante, além da pressão da coluna d'água nas áreas de recarga.

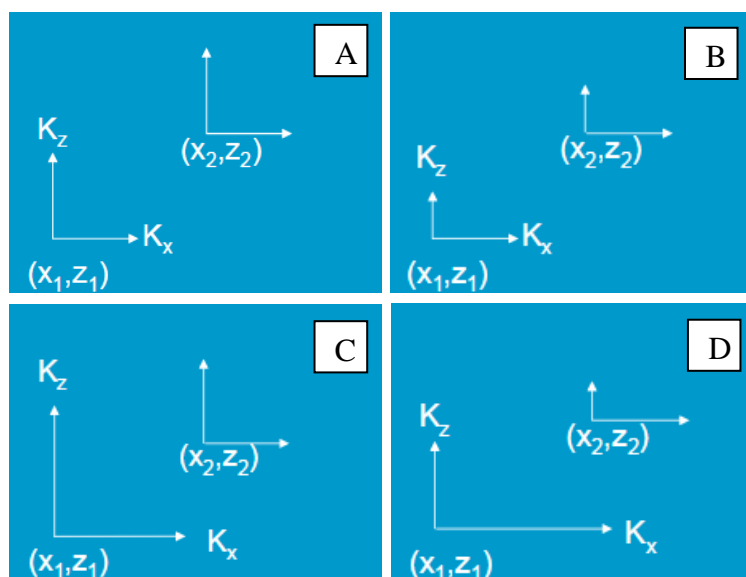
**Figura 26** - Tipos de aquíferos e a relação com a condutividade hidráulica. Fonte: Giampá e Gonçalves (2006).



## 2.5.2 Homogeneidade, heterogeneidade, anisotropia e isotropia

Quando um meio possui propriedades constantes em todos os pontos, denomina-se homogêneo (**Figura 27 – A e B**). Caso contrário, representa um aquífero heterogêneo (**Figura 27 – C e D**). No entanto, se for considerado somente um ponto deste meio, o qual possui o mesmo valor em todas as direções, é denominado de isotrópico (**Figura 27 – A e C**), e o inverso anisotrópico, **Figura 27 – B e D** (CUSTODIO; LLAMAS, 1976; KRUSEMAN; RIDDER, 1991; FETTER, 2001). A condutividade hidráulica é uma propriedade utilizada para caracterizar o aquífero nesses termos.

**Figura 27** - Diferentes tipos de aquíferos: **A)** Isotrópico e homogêneo; **B)** Anisotrópico e homogêneo; **C)** Isotrópico e heterogêneo; **D)** Anisotrópico e heterogêneo.



## 2.6 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

Para um melhor entendimento do arcabouço hidrogeológico depende, primeiramente, da elaboração de um modelo conceitual hidrogeológico que consiste em uma representação esquemática das características do aquífero. Essas informações dizem respeito à disposição dos estratos (tipo de aquífero: livre, confinado ou semiconfinado e seus domínios/subdomínios hidrogeológicos), parâmetros hidráulicas (produtividade), fluxo subterrâneo, taxa de recarga, áreas de recarga e descarga. Para sua elaboração torna-se necessário reunir a maior quantidade de informações, como dados hidrogeológicos dos poços, geológicos, topográficos e de precipitação. Informações complementares podem ser acrescentadas para sua melhor caracterização, tal como o tipo de água, pH ou qualquer dado que se julgar necessário.

Sua representação é possível na forma gráfica plana horizontal, vertical ou tridimensional (FEITOSA et al., 2008). A representação plana horizontal consiste na divisão da área em domínios/subdomínios hidrogeológicos que possuem afinidades hidrogeológicas e pertençam a uma ou mais unidades geológicas. Os domínios hidrogeológicos ocorrem dos tipos: poroso, fraturado, cárstico ou misto, visto que este último é a associação de dois domínios de tipos diferentes. Estes domínios podem ser divididos em subdomínios de acordo com a produtividade relacionada a sua composição.



Com relação à representação plana vertical, esta consiste na correlação de perfis estratigráficos e dados hidrogeológicos dos poços os quais resultam em uma seção hidrogeológica onde é possível visualizar a disposição e a relação das camadas do aquífero. A interseção entre essas duas representações definem, a priori, o modelo hidrogeológico conceitual tridimensional sendo possível visualizar as informações do aquífero.

O modelo conceitual hidrogeológico, portanto, trata-se de uma ferramenta que permite um melhor entendimento do aquífero, essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos em conjuntos com as ações das bacias hidrográficas regionais.

## 2.7 COMPOSIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água quando proveniente da chuva reage, primeiramente, com o ar atmosférico e ao chegar à superfície do terreno, uma parte evapora e outra se infiltra/percola pelas áreas de recarga. Nas primeiras camadas ou zona de aeração, a água meteórica assimila elementos químicos presentes nos poros do solo, como gases dissolvidos e compostos orgânicos liberados, decorrentes da oxidação da matéria orgânica, como o dióxido de carbono, por exemplo (FEITOSA et al., 2008). De acordo com os autores, esta molécula é dissolvida na água pelo processo denominado carbonatação e dará origem a um ácido carbônico. Por sua vez, este ácido fraco é dissociado facilmente em  $H^+ + HCO_3^-$  que dissolverão e assimilarão os íons móveis presentes nos constituintes inorgânicos dos solos, sedimentos e rochas (FETTER, 2001). Desta forma, as propriedades físico-químicas iniciais da água se alteram até atingir as zonas de descarga (VAITSMAN; VAITSMAN, 2005). Durante este trajeto, o novo rearranjo das moléculas de água pode estar associado à entrada e saída de elementos decorrentes de fatores naturais e/ou antrópicos.

Ações antrópicas podem contribuir na inserção ou no aumento de um determinado componente, como é o caso do nitrato, cloreto e fosfato, os quais são íons resultantes possivelmente dos fertilizantes agrícolas ou lixões.

A origem natural dos elementos na água subterrânea pode estar ligada à lixiviação de minerais ricos em elementos que são facilmente dissolvidos (FEITOSA et al., 2008). Nesse contexto, Hiscock (2005) menciona que os principais íons que compõem as águas subterrâneas são o sódio ( $Na^+$ ), o cálcio ( $Ca^{2+}$ ), o magnésio ( $Mg^{2+}$ ), o cloro ( $Cl^-$ ), o bicarbonato ( $HCO_3^{2-}$ ) e o sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), perfazendo até 90% dos sólidos totais dissolvidos (**Figura 28**).

**Figura 28** - Quadro com a composição da água subterrânea. Fonte: Freeze e Cherry (1979).

<b>COMPOSIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA</b>	
Íons principais > 5 mg.L <sup>-1</sup> )	Bicarbonato, cloreto, sulfato, sódio, cálcio, magnésio
Íons menos comuns (0,01 – 10,0 mg.L <sup>-1</sup> )	Nitrato, carbonato, fluoreto, fosfato, potássio, estrôncio, ferro, boro
Constituintes traços <0,1 mg.L <sup>-1</sup>	Alumínio, arsênio, bário, brometo, cádmio, cério, cromo, cobalto, ouro, iodo, chumbo, lítio, magnésio, níquel, rádio, selênio, sílica, prata, tório, estanho, titânio, urânio, vanádio e zinco

Classificar a água subterrânea torna-se importante para determinar sua composição e assim inferir sua origem natural ou antrópica, além de indicar a classe para seu uso - Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008) e Portaria nº 518 (BRASIL, 2004).

### 2.7.1 Balanço iônico

O balanço iônico, como relação entre a concentração em mEq/L, dos cátions e ânions, expressa o equilíbrio entre os íons por meio da **Equação 13**, onde erro (%) refere-se ao coeficiente de erro de análise. Este coeficiente de erro deve ser menor ou igual a 10% (FEITOSA et al., 2008), caso contrário, indicará que existem quantidades anormais de íons menores não analisados ou um erro de análise de laboratório (CUSTODIO; LLAMAS, 1976). O balanço iônico se faz necessário para selecionar as amostras com melhor proporção de cátions e ânions, as quais são utilizadas na classificação do Diagrama de Piper.

$$\text{Erro (\%)} = 100 * [(\sum \text{cat} - \sum \text{an}) / (\sum \text{cat} + \sum \text{an})] \quad \text{Equação 13}$$

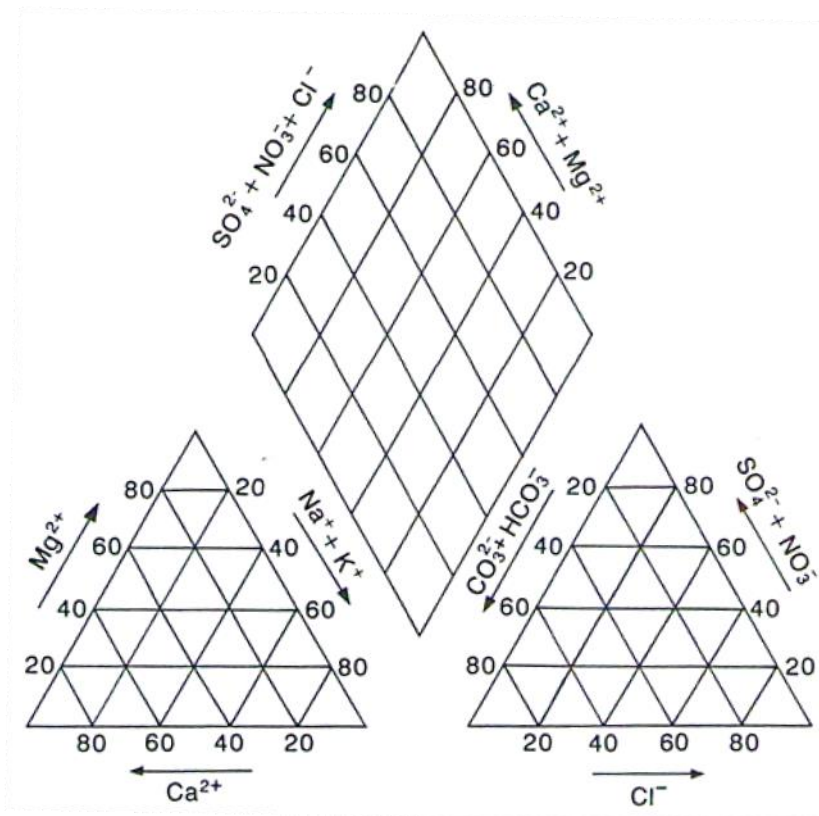
$\sum \text{cat}$  – somatório de cátions;  $\sum \text{an}$  – somatório de ânions.

#### a) Classificação de Piper

A classificação da água subterrânea pode ser feita com base no Diagrama de Piper, também conhecido como diagrama trilineares. Esta classificação é realizada com base nos íons dominantes, como: cálcio, sódio, magnésio, potássio, cloro, sulfato e bicarbonato. Giampá e Gonçalves (2006) abordam que este método desenvolvido por Piper (1944) é constituído por dois triângulos equiláteros, sendo que no triângulo da esquerda são distribuídos os cátions e no da direita os ânions, como visto na **Figura 29**. Pontos referentes à concentração de cada íon são plotados no triângulo correspondente, os quais são unidos em

um losango, onde é possível verificar a classificação da água em bicarbonatadas sódicas; cálcicas-magnesianas bicarbonatadas; sulfatadas ou cloretadas sódicas; e sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas.

**Figura 29** - Representação do diagrama de Piper. Giampá e Gonçalves (2006).



### 3 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO E HIDROQUÍMICO

#### 3.1 HIDROGEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

A partir dos tipos de rocha e estruturas relacionadas à porosidade e à permeabilidade (poros e fraturas) no estado de Rondônia, foi possível o reconhecimento das categorias de aquífero poroso e fraturado (MORAIS, 1998). O referido autor subdividiu essas categorias em seis sistemas aquíferos denominados: aquíferos intergranulares descontínuos livres a semiconfinados; aquíferos intergranulares contínuos, livres; aquíferos fraturados descontínuos, livres; aquíferos locais restritos às zonas fraturadas, livres; aquíferos intergranulares/fraturados, livres ou confinados; e aquíferos de baixo potencial hídrico.

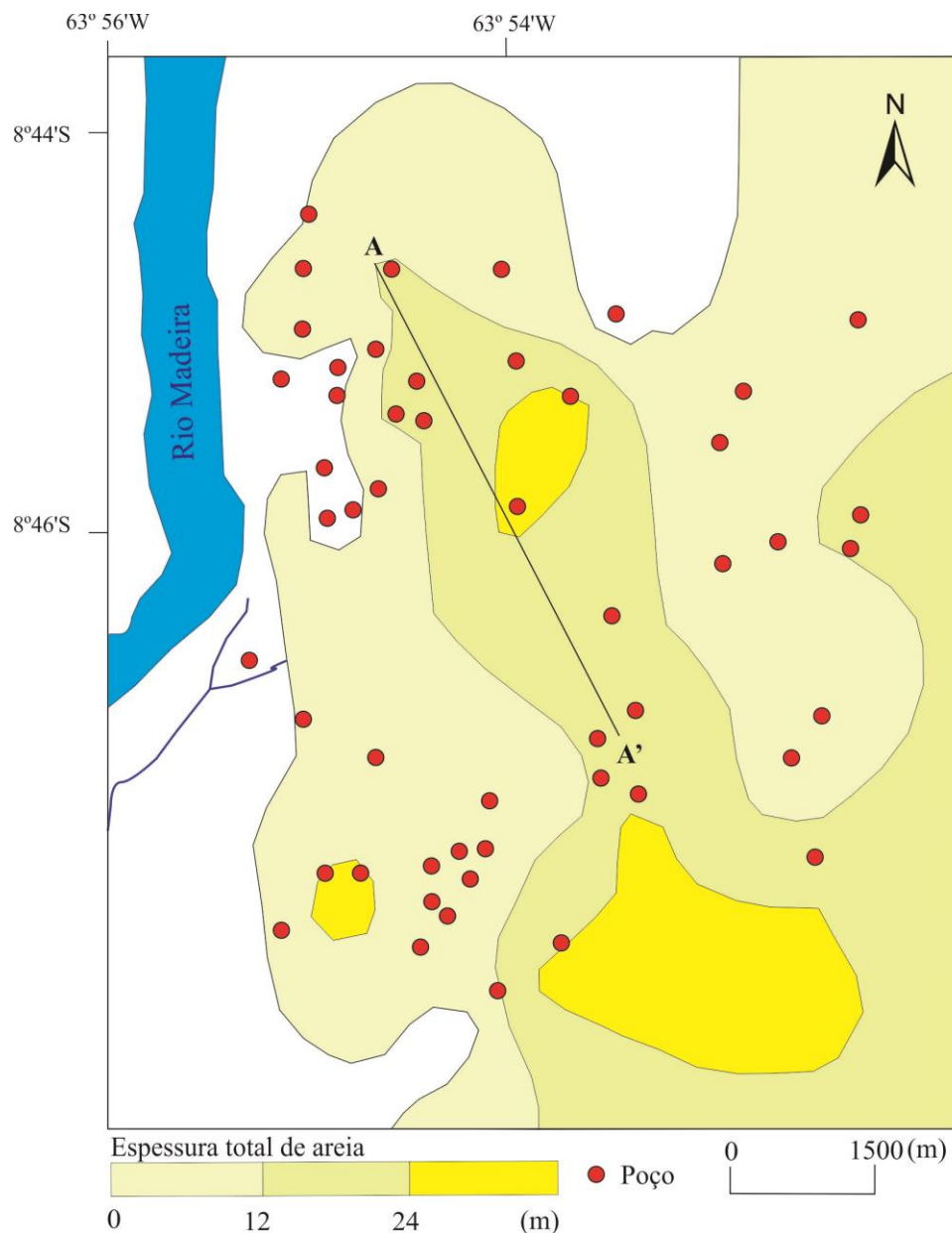
A cidade de Porto Velho enquadra-se na categoria poroso e no sistema de aquíferos intergranulares descontínuos livres a semiconfinados (MORAIS, 1998). Segundo o autor, a categoria poroso refere-se às características primárias da rocha, ou seja, a porosidade é a que está diretamente ligada ao armazenamento e percolação da água. Com relação aos aquíferos intergranulares descontínuos, livres a semiconfinados, estes são constituídos por sedimentos terciários e quaternários, aluvionares e coluvionares, de origem fluvial e lacustre. Os sedimentos são mal selecionados, com granulometria desde cascalho até argila, inconsolidados a semiconsolidados. Podem ocorrer camadas argilosas ou silto-argilosas com baixa permeabilidade, conferindo-lhes um caráter de semiconfinamento. A produtividade é variada com vazão específica de até  $36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  até poços improdutivos, com vazão específica média de  $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . A transmissividade tem valor médio de  $6,03 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , com valores que variam de  $6,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $4,27 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Os aquíferos em sedimentos inconsolidados descrevem uma superfície mais aplainada e são gerados por processos coluvionares e aluvionares, de origem fluvial e lacustre, compostos por um material mais grosso na base e mais fino no topo, o que o caracteriza como heterogêneo. São considerados ótimos para locação de poços, pois não requerem a perfuração profunda, posto que o nível de água encontra-se, geralmente, raso. Esta categoria de aquífero possui uma boa facilidade de recarga devido a sua própria composição, à baixa declividade, além de ser abastecido pela água da chuva, por lagos e rios, quando o nível estático é profundo (FEITOSA et al., 2008).

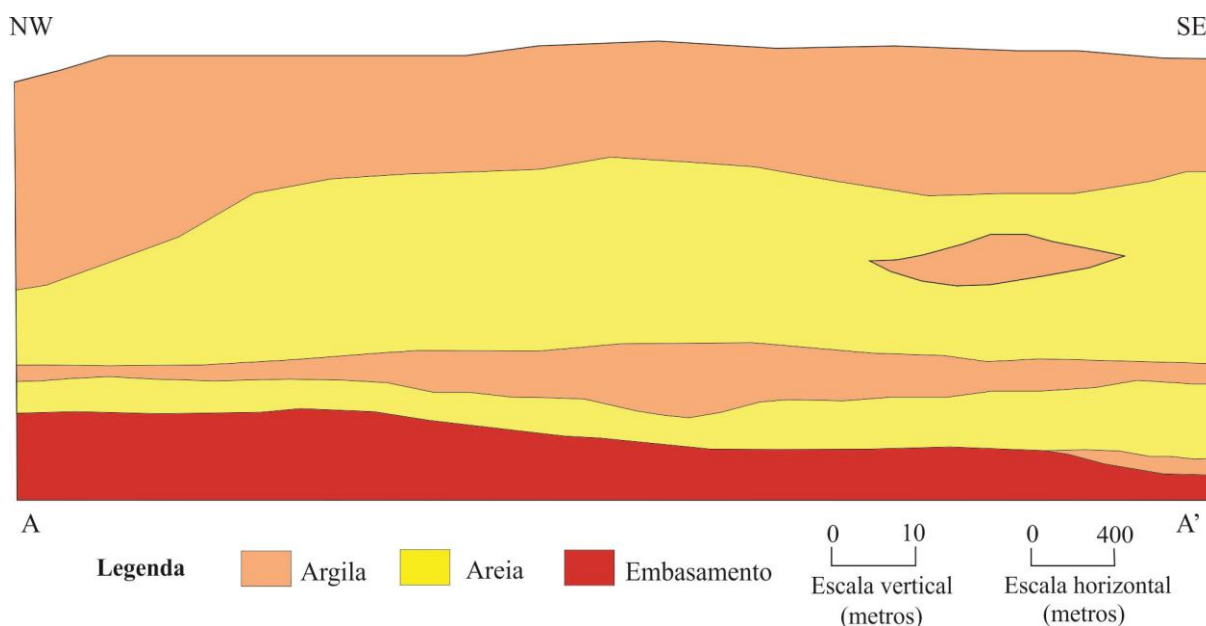
Campos (1998) elaborou a avaliação preliminar sobre o potencial hidrogeológico da cidade de Porto Velho com base em 8 poços tubulares e definiu que a vazão específica varia de 0,11 a  $5,3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , e a transmissividade varia de 0,59 a  $143 \text{ m}^2/\text{dia}$ , além de verificar que o aquífero é heterogêneo e composto por uma camada de 50 metros de sedimentos. Campos e

Morais (1999) caracterizaram a morfologia do aquífero com base em 51 poços tubulares e concluíram que a mesma é constituída por uma camada de areia média a grossa, com espessura de 12 a 32 metros, largura de 1.500 a 2.500 metros e comprimento de 9.000 metros com direção NW-SE, associada a um paleocanal (**Figura 30**). Ressaltaram, ainda, que o aquífero possui lentes de laterita e uma camada de argila no topo (**Figura 31**) sugerindo o aquífero tipo confinado, e que os locais onde o aquífero aflora seria sua área de recarga. Melo Junior e Costi (2004) indicaram que na zona sudoeste o nível estático variou de 2,8 a 6,2 m, e a condutividade hidráulica de 0,1434 e 0,127m/dia, com fluxo de SE para NW.

**Figura 30** - Mapa de espessura total de areia com a localização da seção esquemática A-A'.  
Fonte: Campos e Moraes (1999).



**Figura 31** - Seção esquemática A – A' ao longo do possível paleocanal demonstrando a continuidade das camadas arenosas. Fonte: modificado de Campos e Moraes (1999).



### 3.2 HIDROGEOQUÍMICA REGIONAL E LOCAL

Moraes (1998) caracterizou as águas subterrâneas da cidade de Porto Velho por meio da análise de 4 poços e classificou-as no Diagrama de Piper em cloretada sódica e mista, com variação de pH de 3,9 a 4,26 e condutividade elétrica de 10,8 a 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , indicando um possível excesso de ferro relacionado à presença de lateritas.

Em termos de qualidade, as águas subterrâneas da área urbana e proximidades de Porto Velho vêm sendo constantemente estudadas e apresentam alguns resultados não satisfatórios. Campos et al. (2004) avaliaram 30 poços na porção noroeste da área urbana de Porto Velho e determinaram que a quantidade de cloreto de 0,9 a 15,97  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e de nitrato variou de 0,64 a 26,43 mgN/L. Melo Júnior e Costi (2004) constataram contaminação por hidrocarbonetos na porção sudoeste. Lima (2008) verificou a contaminação por nitrato na porção sul da cidade de Porto Velho e Rodrigues et al. (2014) identificaram que as águas estão contaminadas por coliformes fecais e totais acima do limite permitido pelo Ministério da Saúde, principalmente a porção centro-sudoeste da cidade. Nestes estudos, os autores relacionaram a contaminação de origem antrópica por fossas sépticas ou vazamento de tanques de combustível.

#### 4 IMPORTÂNCIA DO AQUÍFERO PARA O DESENVOLVIMENTO REGIONAL

Por efeito do declínio do ciclo da borracha, a Região Amazônica como fronteira internacional encontrava-se no início da década de 1980 em uma situação vulnerável devido a baixa densidade demográfica. A fim de contribuir para o desenvolvimento regional do noroeste do Brasil, em 1981, o Governo Federal lança o Programa Integrado de Desenvolvimento do Noroeste do Brasil – POLONOROESTE, por meio do Decreto nº 86.029 (BRASIL, 1981), o qual propôs:

Art. 3º (...)

I - concorrer para a maior integração nacional;

II - promover a adequada ocupação demográfica da região-programa, absorvendo populações economicamente marginalizadas de outras regiões e proporcionando emprego;

III - lograr o aumento significativo na produção da região e na renda de sua população;

IV - favorecer a redução das disparidades de desenvolvimento, a níveis inter e intra-regionais; e

V - assegurar o crescimento da produção em harmonia com as preocupações de preservação do sistema ecológico e de proteção às comunidades indígenas.

O Polonoroeste abordou um desenvolvimento econômico através da integração de Rondônia a Mato Grosso com a construção da BR-364, em harmonia com o meio ambiente. Contudo, a realidade foi bem diferente, pois o Plano resultou em um crescimento desordenado da região, afetando, em especial, o meio ambiente, as comunidades indígenas e a qualidade de vida da população em geral (EULER et al., 2008).

Para corrigir e impedir o surgimento de novos problemas socioambientais, os governos estadual e federal, com financiamento e exigências do banco Mundial, formularam o primeiro Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico - ZSEE do estado de Rondônia, conforme o Decreto Estadual nº 3.782 (RONDÔNIA, 1988), o qual foi utilizado na criação do Plano Agropecuário e Florestal de Rondônia – PLANAFLORO. Logo, a finalidade do ZSEE, em conjunto com o PLANAFLORO, era impulsionar a produção associada ao desenvolvimento sustentável das áreas desflorestadas, inclusão social, além da criação e manejo das unidades de conservação (EULER et al., 2008). Assim, este zoneamento instigou a criação e aplicação de leis e políticas públicas essenciais para subsidiar a gestão, planejamento e proteção ambiental, bem como a melhoria da infraestrutura no estado.

Partindo dessa premissa, o cenário atual no que diz respeito à infraestrutura, gestão e planejamento dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na área urbana de Porto Velho (RO), não atingiu o estado da arte e encontra-se em desenvolvimento.

Em termos de infraestrutura, a área urbana conta com 34,47% de abastecimento de água e 2,07% de captação de água e esgoto (BRASIL, 1996), gerenciados pela Companhia de Abastecimento de Água e Esgoto de Rondônia – CAERD, a qual foi criada pelo Decreto-Lei nº 490 (BRASIL, 1969). A CAERD, como uma concessionária do tipo agregada, de sociedade de economia mista com administração pública (BRASIL, 1996), capta água do rio Madeira e do sistema aquífero local.

Para promover o desenvolvimento regional e a conservação do meio ambiente no estado de Rondônia, foi criada a Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental – SEDAM, que integra o Sistema Estadual de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia – SEDAR, de acordo com Lei nº 547 (RONDÔNIA, 1993).

As providências voltadas especificamente para a administração geral dos recursos hídricos foram regulamentadas pela Lei Complementar nº 255 (RONDÔNIA, 2002), com a criação do Sistema Estadual de Recursos Hídricos – SERH/RO que tem como componentes integrantes:

Art. 8º (...)

- I - o Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH/RO;
- II - a Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental – SEDAM;
- III - os Comitês de Bacia Hidrográfica – CBH; e
- IV - as Agências de Bacia Hidrográfica – ABH.

Além do SERH/RO, a Política Nacional dos Recursos Hídricos foi instituída em concordância com o art.1º e é composta por diretrizes que serão concretizadas em conjunto com esses órgãos gestores com base no Plano Estadual de Recursos Hídricos, conforme o art. 24º da Lei Complementar nº 255.

Por conseguinte, ficou definida para a SEDAM a função de gerenciar os mananciais e cumprir as seguintes obrigações:

Art. 9º (...)

- I - promover e supervisionar a implementação da Política de Recursos Hídricos do Estado de Rondônia;
- II - emitir outorga preventiva e a outorga de direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio do Estado de Rondônia;
- III - exercer a fiscalização, com poder de polícia administrativa no âmbito de sua competência;
- IV - aplicar as sanções previstas na Lei Complementar nº 255, de 2002; e
- V - gerir o Fundo Estadual de Recursos Hídricos - FRH/RO.

A gestão das águas subterrâneas visará os objetivos da Política de Recursos Hídricos do Estado de Rondônia, ou seja, o órgão gestor de gerenciamento deverá “promover o uso racional, o gerenciamento integrado e o uso múltiplo das águas de domínio do Estado,



superficiais e subterrâneas” (RONDÔNIA, 2002. Art.3º). E para isso, a SEDAM tem a possibilidade de usar os seguintes instrumentos de gestão:

Art.18º (...)

I - o Plano Estadual de Recursos Hídricos PRH/RO;

II - os Planos de Bacias Hidrográficas;

III - a outorga dos direitos de uso das águas; (...)

IV - a cobrança pela utilização das águas;

V - enquadramento dos corpos d'água em classes, segundo seus usos preponderantes; e

VI - sistema de Informações dos recursos hídricos.

O gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos seguirá regras básicas que são desenvolvidas, entre outros fatores, a partir de uma análise das características dos aquíferos, a fim de garantir a qualidade e a quantidade de água subterrânea (VIDAL, 2003).

Logo, o entendimento das características do sistema aquífero é de grande valia no que diz respeito à gestão e planejamento do manancial subterrâneo, o qual deve ser explorado em conjunto com outras fontes e, conforme a Política Estadual dos Recursos Hídricos (RONDÔNIA, 2002), deverá:

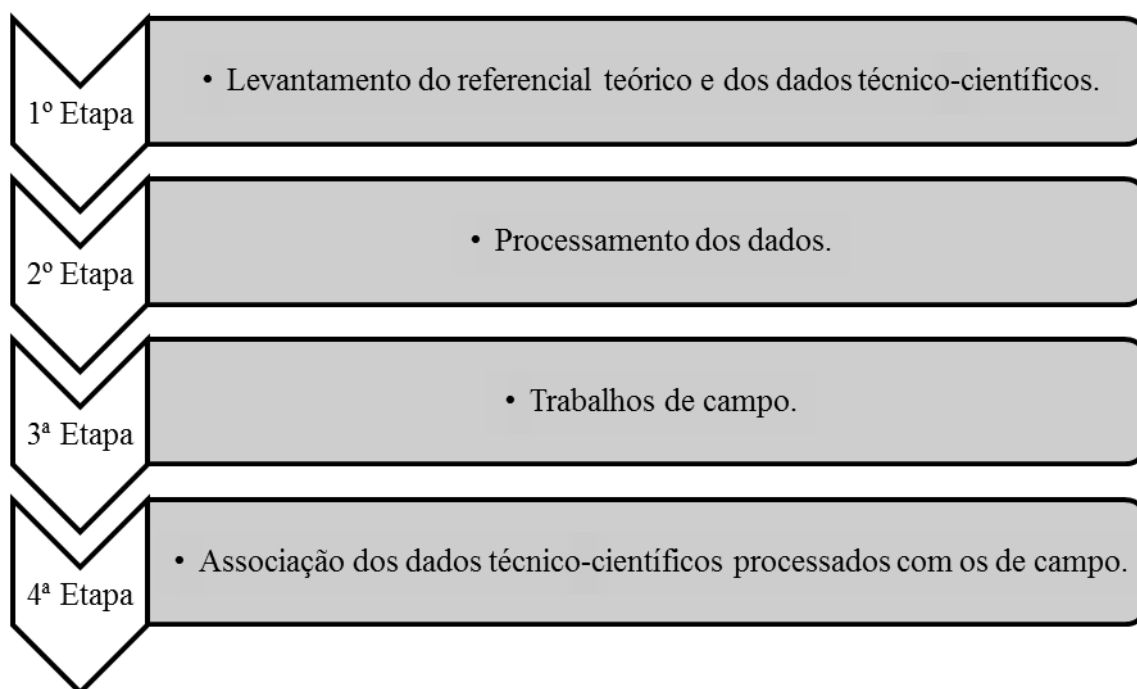
Art. 3º (...) promover o uso racional e gerenciamento integrado e o uso múltiplo das águas do domínio do Estado, superficiais e subterrâneas, e obedecerá às seguintes diretrizes:

I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo ora apresentado foi desenvolvido em quatro etapas distintas, no período decorrido de outubro de 2014 a outubro de 2016, conforme **Figura 32**.

**Figura 32** - Fluxograma das etapas do estudo.



O levantamento bibliográfico foi realizado nas bibliotecas da Universidade Federal de Rondônia – UNIR, Secretaria do Desenvolvimento Ambiental do Estado de Rondônia – SEDAM, Serviço Geológico do Brasil – CPRM e sítios eletrônicos acadêmicos. Os dados técnico-científicos referem-se aos testes de bombeamento, curvas de nível, parâmetros hidráulicos, dados físico-químicos das águas subterrâneas. Em campo, foram utilizados o GPS, câmera fotográfica, martelo e lupa de bolso. Nos trabalhos de escritório utilizou-se os *softwares ArcGis, CorelDRAW, Word, Excel e Qualigraf*. Os materiais e suas especificações ou fontes encontram-se relacionadas na **Figura 33**.

No tocante ao desenvolvimento do estudo, na elaboração dos mapas adotou-se a projeção geográfica e o Datum SIRGAS 2000 conforme a orientação do IBGE (2005). A sequência de obtenção dos dados encontra-se na **Figura 34**.

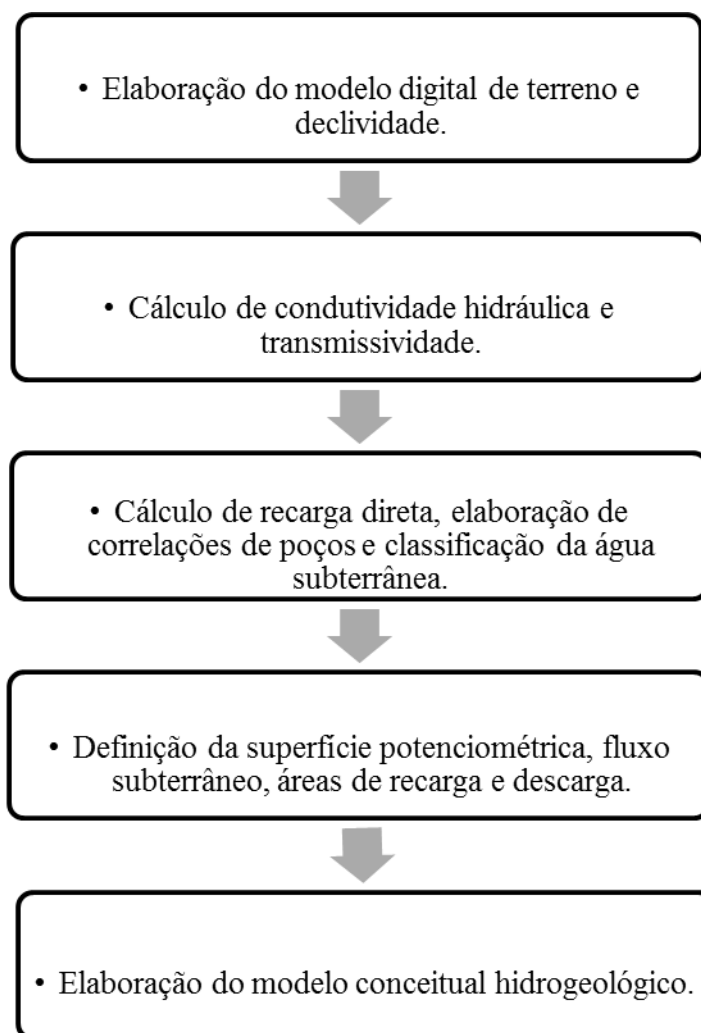
Dando prosseguimento, elaborou-se o modelo digital do terreno, mapas de declividade, condutividade hidráulica, fluxo de água subterrâneo, definição de locais de

recarga e descarga, bem como classificou-se o tipo de água subterrânea e a idealização do modelo conceitual hidrogeológico.

**Figura 33** - Quadro dos materiais utilizados no estudo.

<b>MATERIAIS</b>	<b>ESPECIFICAÇÕES E/OU FONTE</b>
Clima	SEDAM (2012)
Precipitação, temperatura	SEDAM (2015)
Normais climatológicas	Fortes (2009)
Bacias hidrográficas	<i>Shapefiles</i> da região hidrográfica do rio Amazonas (ANA, 2011), região hidrográfica do rio Madeira (FERNANDES, 2000) e <i>shapefiles</i> das sub-bacias hidrográficas urbanas (SIPAM, 2014)
Vegetação, geomorfologia, solos.	<i>Shapefiles</i> na escala 1:250.000 (RONDÔNIA, 1999)
Geologia e hidrografia.	<i>Shapefiles</i> na escala 1:1.000.000 (OLIVEIRA, 2013)
Imagem de satélite	<i>Worldview-2</i> (SEMPA, 2001)
Curva de nível (resolução espacial de 1 metro), hidrografia e vias urbanas	<i>Dxf</i> , datum SAD 69 (SEMPA, 2001)
Testes de bombeamento	16 testes elaborados pela GEOPOÇOS – Hidroconstruções e Comércio Ltda (CAERD, 2004)
Parâmetros hidráulicos	185 poços (CPRM, 1997, atualização permanente)
Estratigrafia	189 poços (CPRM, 1997, atualização permanente)
Nível estático	Dados de 4 poços referentes ao período de outubro de 2011 a abril de 2013 CPRM (2015)
Parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas	93 poços referentes a abril de 2013 CPRM (2015)
GPS	GPSMAP® 78s – GARMIN
Câmera fotográfica	OLYMPUS <i>Stylus tough</i> – 3000 (12 megapixel)
Martelo	Comprimento 330 mm – Estwing
Lupa de bolso	Aumento de 10x
<i>Software</i>	<i>ArcGis</i> 10.1 – ESRI
<i>Software</i>	<i>CorelDRAW Graphics Suite X8 trial</i>
<i>Software</i>	<i>Google Earth</i>
<i>Software</i>	Word e Excel - <i>Microsoft Windows</i> 2010
<i>Software</i>	Qualigraf

**Figura 34** - Fluxograma da sequência adotada para elaboração do modelo conceitual hidrogeológico.



### 5.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO E DECLIVIDADE

O delineamento da superfície do terreno contribuiu para este trabalho em função da homogeneização das cotas topográficas na boca dos poços, as quais foram necessárias para a análise de padrões de feições do terreno, determinação das superfícies potenciométricas e para a construção de seções hidroestratigráficas.

Nesse sentido, com o intuito de determinar as cotas topográficas da área de estudo, o modelo digital de terreno (MDT) auxiliou na análise por meio da representação matemática da superfície do terreno pelas coordenadas X, Y e Z (ROCHA, 2000). O MDT é uma ferramenta que substitui a interpolação linear de curvas de nível geradas por levantamentos topográficos ou fotogramétricos os quais podem ser gerados pelos métodos de modelagem: GRID e TIN - a partir de sensores orbitais (ROCHA, 2000; SILVA, 2007).

No programa ArcGis 10.1 realizou-se a transformação das curvas de nível de *dxf* para *shapefile* e definiu-se sua projeção original, datum SAD 69, a qual foi transformada para SIRGAS 2000, de acordo com a orientação do IBGE (2005). Além disso, as linhas duplicadas foram eliminadas e ajustadas. Em seguida, gerou-se o TIN com a ferramenta *ArcToolbox > Data Management > TIN > Create TIN* que transformou-o em GRID (*ArcToolbox > Conversion > From TIN > TIN to raster*).

Florenzano (2008) descreve a declividade como a inclinação do terreno a partir de um plano horizontal o qual pode ser expresso em graus ou porcentagem. Nos estudos hidrogeológicos, a declividade representa um fator importante de determinação das áreas de recarga visto que locais de alta declividade são inapropriados para a recarga do aquífero. No entanto, as porções com menor declividade favorecem o acúmulo de água e percolação da água no substrato. O mapa de declividade foi gerado no ArcGis 10.1 com a ferramenta *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Slope* e adotou-se a classificação de declividade, em porcentagem, da Embrapa (1979).

## 5.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E TRANSMISSIVIDADE

Com a necessidade da definição das características hidráulicas para a caracterização do aquífero e para o entendimento do comportamento dinâmico da água subterrânea nos diferentes materiais de subsuperfície, primeiramente foram processados os dados referentes aos parâmetros hidráulicos e estratigráficos.

Importou-se a tabela do Excel, referente aos dados hidrogeológicos, sem data especificada da coleta dos dados (nível estático, nível dinâmico, rebaixamento, vazão, vazão específica e estratigrafia), de poços tubulares provenientes da CAERD (2004) e da CPRM (1997, atualização permanente) para o ArcGis 10.1. Deparou-se com uma grande quantidade de dados e observou-se que nem todos tinham as informações necessárias. Desta maneira, fez-se uma triagem dos dados a fim de selecionar os poços com dados completos obtendo-se, então, um grupo de 189 poços com informações estratigráficos e 185 poços com informações de parâmetros hidráulicos.

No entanto, para o cálculo da condutividade hidráulica e transmissividade utilizou-se as informações do memorial descritivo dos 189 poços associados aos 16 poços com teste de bombeamento provenientes da Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia – CAERD (2004), elaborados pela GEOPOÇOS – Hidroconstruções e Comércio Ltda.

Para os cálculos da condutividade e transmissividade, os métodos que levam em consideração a penetratividade e a distância entre os poços (raio) de bombeamento e observação foram descartados, pois muitos poços de estudo não interceptam o embasamento (penetratividade) e nenhum possui poços de observação (raio entre os poços). Os dados disponíveis foram rebaixamento, tempo, vazão, espessura da camada saturada, além da estratigrafia contida no memorial descritivo desses poços. Para os que não continham essa informação utilizou-se a estratigrafia de poços próximos a eles.

Com base na disponibilidade dos dados e no tipo de aquífero, optou-se pelo método descrito por Kruseman e Ridder (1991) e Fetter (2001), denominado Ponto de Inflexão de Hantush, em razão de ser o método que melhor se ajusta à disponibilidade dos dados.

### 5.3 RECARGA DIRETA

A recarga foi estimada pelo método da flutuação do lençol freático - FLF ou *Water Table Fluctuation* - WTF de Healy e Cook (2002).

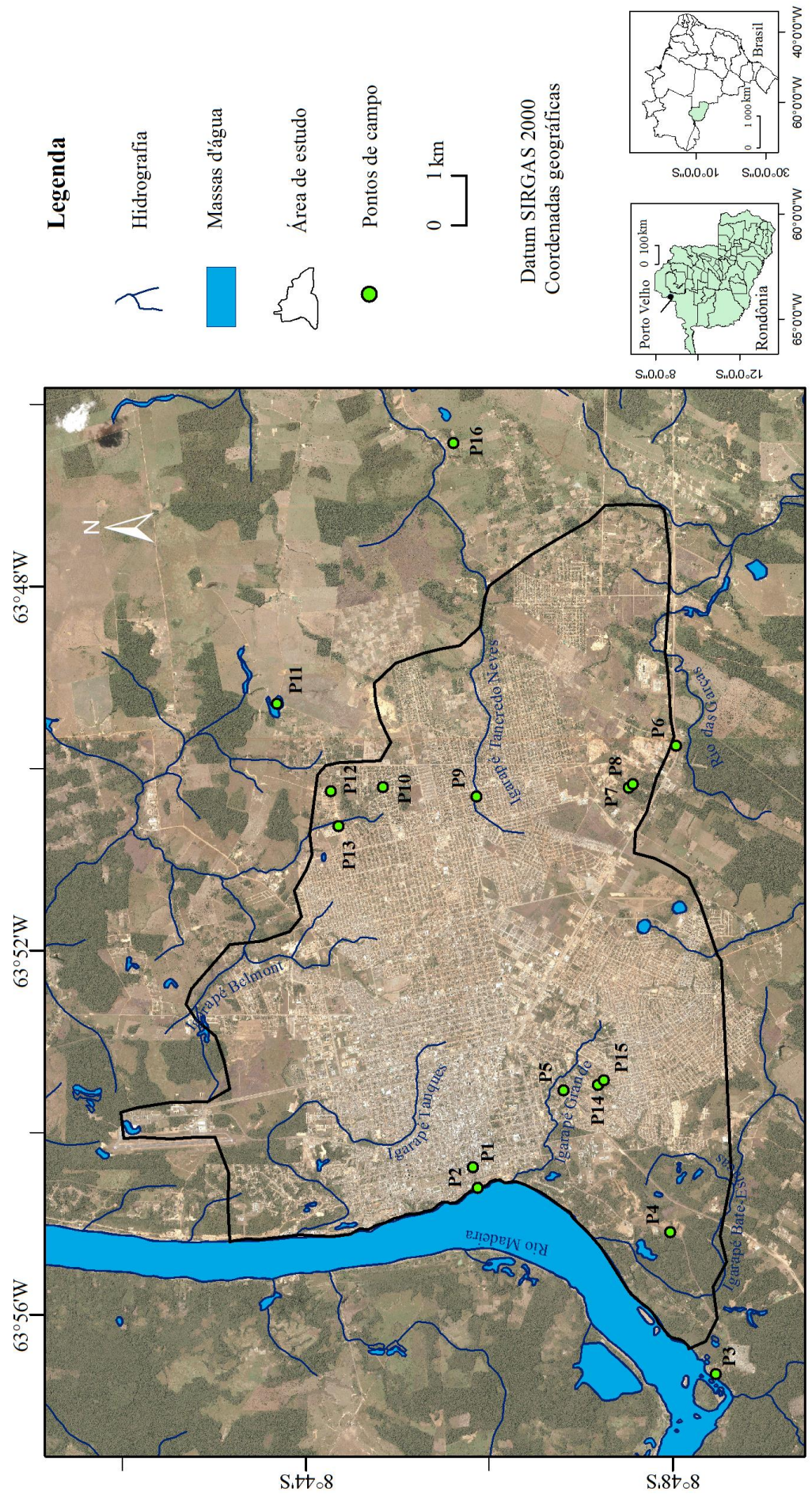
A princípio, selecionou-se os poços JR 006 – 54, JR 004 -38, JQ 991 – 41, JQ 962 - 21 e JQ 928 – 24 que tinham valores de nível estático dos meses de outubro de 2011, e abril, outubro e novembro de 2012, bem como abril de 2013 (CPRM, 2015). Obteve-se a variação do nível estático através da diferença entre os valores de nível estático correspondente à distância entre a extrapolação da curva de recessão antecedente e ao valor máximo do nível estático para um intervalo de tempo. Em seguida, relacionou-se a composição (onde ocorre a variação do nível estático) descrita na estratigrafia dos poços selecionados ou próximo a eles (CPRM, 1997 - atualização permanente; CAERD, 2004), com o rendimento específico ( $S_y$ ) estabelecido por Johnson (1967), **Figura 23, p. 44**.

### 5.4 TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram realizados em duas etapas: 10 e 17 de setembro de 2016. Contemplando um total de 16 pontos de campo visitados na área de estudo e seu entorno (**Figura 35**), com o prévio planejamento de campo por meio de mapa base e acesso ao *Google Earth*, foram realizados registros fotográficos, coleta de amostras e coordenadas geográficas, além de anotações a respeito do material dos afloramentos para melhor compreender e ilustrar o modelo conceitual hidrogeológico.



Figura 35 - Mapa de localização dos pontos de afloramentos visitados em campo. Imagem Worldview (SEMPLA, 2001).



## 5.5 PERFIS HIDROESTRATIGRÁFICOS

Para visualização da relação entre a composição e a disposição das camadas foram traçados 7 perfis topográficos (**Figura 36**), procurando interceptar o maior número de poços (CPRM, 1997 - atualização permanente) com informações a respeito da estratigrafia e nível estático. Por meio do *software Corel DRAW trial* representaram-se as cotas topográficas extraídas do modelo digital de terreno referente a cada perfil, além da composição e espessura das camadas interceptadas pelos poços (**Apêndices A, B, C, D, E, F e G**). Identificaram-se 9 grupos denominados: argila, argila com areia, areia fina, areia média a grossa, argila laterítica, cascalho, laterita coesa, saprólito e granitoide. O diâmetro dos poços foi exagerado, logo, estão incompatíveis com a escala apresentada visualização do perfil.

## 5.6 SUPERFÍCIE POTENCIOMETRIA, FLUXO SUBTERRÂNEO E ÁREAS DE RECARGA E DESCARGA

Os valores de nível estático dos poços referentes ao mês de outubro de 2013 (CPRM, 2015) foram exportados para o ArcGis 10.1, determinando-se suas cotas topográficas (obtidas do modelo digital de terreno). Através da ferramenta *Field Calculator* do *ArcGis 10.1* obteve-se a diferença entre a cota topográfica e o nível estático que resultou na cota potenciométrica esta, por sua vez, foi interpolada por *krigagem* para gerar o mapa potenciométrico. A partir deste mapa determinou-se manualmente o fluxo de água subterrânea.

As zonas de recarga foram definidas com base nas linhas de fluxo de água subterrânea divergentes; e as de descarga foram definidas onde as linhas de fluxo subterrâneo se convergem, de acordo com Fetter (2001).





## 5.7 CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Para a classificação da água subterrânea foram utilizados os dados físico-químicos de 92 poços do período de chuva (abril de 2013), realizados pela LAPEF - Laboratório de análise de água e efluentes para o projeto “Avaliação da Qualidade da Água Subterrânea no Município de Porto Velho/RO – Brasil” (CPRM, 2015). Os dados são referentes à localização geográfica, nível estático e análise físico-química da água (pH, temperatura, nível estático, total de sólidos dissolvidos, oxigênio dissolvido, dureza e de íons, em mg/L, de nitrato, amônia, cloreto, manganês, cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, sulfato e ferro).

Primeiramente, analisou-se as concentrações dos íons citados conforme o limites máximos da Resolução nº 396 do BRASIL (2008).

Em seguida, converteu-se a concentração de mg/L para mEq/L e pelo método do Diagrama de Piper (**Figura 29, pág. 53**) fez-se o balanço iônico, conforme a **Equação 13, p.52**, dos íons de sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, bicarbonato e sulfato. Os poços que apresentavam um coeficiente de erro de análise de balanço iônico menor ou igual a 10% foram selecionados em função do equilíbrio entre seus íons (FEITOSA et al., 2008). Fez-se esta classificação no *software* QualiGraf (FUNCEME, 2014).

A partir da classificação no Diagrama de Piper, sendo, estratigrafia, topografia, análise dos valores de pH e da concentração dos íons em maior concentração da água subterrânea, discutiu-se sobre a possível origem natural e/ou antrópica dos íons que fazem parte da sua composição.

## 5.8 SUBDOMÍNIOS E MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICOS

Considerando-se os 189 poços com dados estratigráficos foi identificada a natureza do material referente à camada superior, além do aquífero, do aquitardo e do aquífugo, respaldados por Custodio e Llamas (1976) e Fetter (2001). Foram relacionadas suas espessuras, cotas máximas, mínimas e médias, além da elaboração dos mapas de localização dos poços por composição da camada superior e do mapa com dados de cota topográfica e profundidade dos poços que interceptaram o embasamento. Este método possibilitou a verificação dos valores máximos, mínimos e médios dos 185 poços selecionados para a análise, com nível estático, nível dinâmico, vazão, vazão específica e rebaixamento. Os dados de vazão específica foram agrupados em 6 classes (DINIZ et al., 2012), conforme a **Figura**

**24, p. 46**, a fim de caracterizar a produtividade da área de estudo. Com isso, identificaram-se os locais de maior e menor produtividade, os quais foram utilizados para auxiliar a divisão da área de estudo em subdomínios hidrogeológicos.

Por meio da análise da vazão específica, composição, estrutura das camadas/perfil estratigráfico dos poços e topografia foi possível a definição de subdomínios hidrogeológicos. Em cada subdomínio foram reunidos poços com comportamentos hidráulicos semelhantes, identificando sua composição, unidade estratigráfica, vazão específica associada à permeabilidade, condutividade hidráulica e produtividade (DINIZ et al., 2012) e tipo de aquífero (CUSTODIO; LLAMAS, 1976).

O problema mais relevante na busca de um detalhamento com base nas descrições desses poços foi em relação às lateritas, pois muitas vezes não foi descrito o seu estado de coesão. Para separá-las utilizou-se da percepção de Guerra (1953) que ao descrever as lateritas de Porto Velho observou que nas cotas mais altas do terreno havia a presença de uma espessa crosta laterítica e nas porções mais baixas as mesmas apresentavam-se em forma de blocos ou nodulares. Dessa forma, valeu-se desse critério para separar as lateritas em coesas, que estão localizadas nas cotas mais elevadas; lateritas incoesas e materiais argilosos mosqueados, que estão localizadas nas cotas menos elevadas.

O modelo conceitual hidrogeológico consistiu na integração dos resultados obtidos (áreas de recarga e descarga, taxa de recarga, subdomínios hidrogeológicos) por meio da descrição e representação gráfica horizontal.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 MODELO DIGITAL DO TERRENO E DECLIVIDADE

A área de estudo apresenta elevações máximas de 110 metros e mínimas de 46 metros, com cota média de 82,5 metros e uma amplitude altimétrica de 64 metros (**Figura 37**).

O relevo é predominante plano com declividades abaixo de 3%, principalmente na porção centro-leste (**Figura 38**). A partir da cota 90 metros, o relevo torna-se forte ondulado com declividades superiores a 20%, destacado por colinas, sobretudo na porção sudeste, sudoeste e centro-norte da área de estudo. Essas feições positivas assimétricas com amplitude de 20 metros formam corpos alongados de até 2.000 metros de comprimento por até 500 metros de largura, com orientação preferencial para NNW e subordinadamente para NNE. Na porção oeste da área de estudo, próximo às drenagens, o relevo é do tipo forte montanhoso com declividades superiores a 75%.

Provavelmente as feições positivas do relevo, formadas pelo perfil laterítico, podem ter sido delineadas a partir da erosão pluvial que se aproveitou das feições negativas (por exemplo, fraturas NNW), facilitando o fluxo aquoso.

**Figura 37** - Modelo digital de terreno (MDT) da área de estudo.

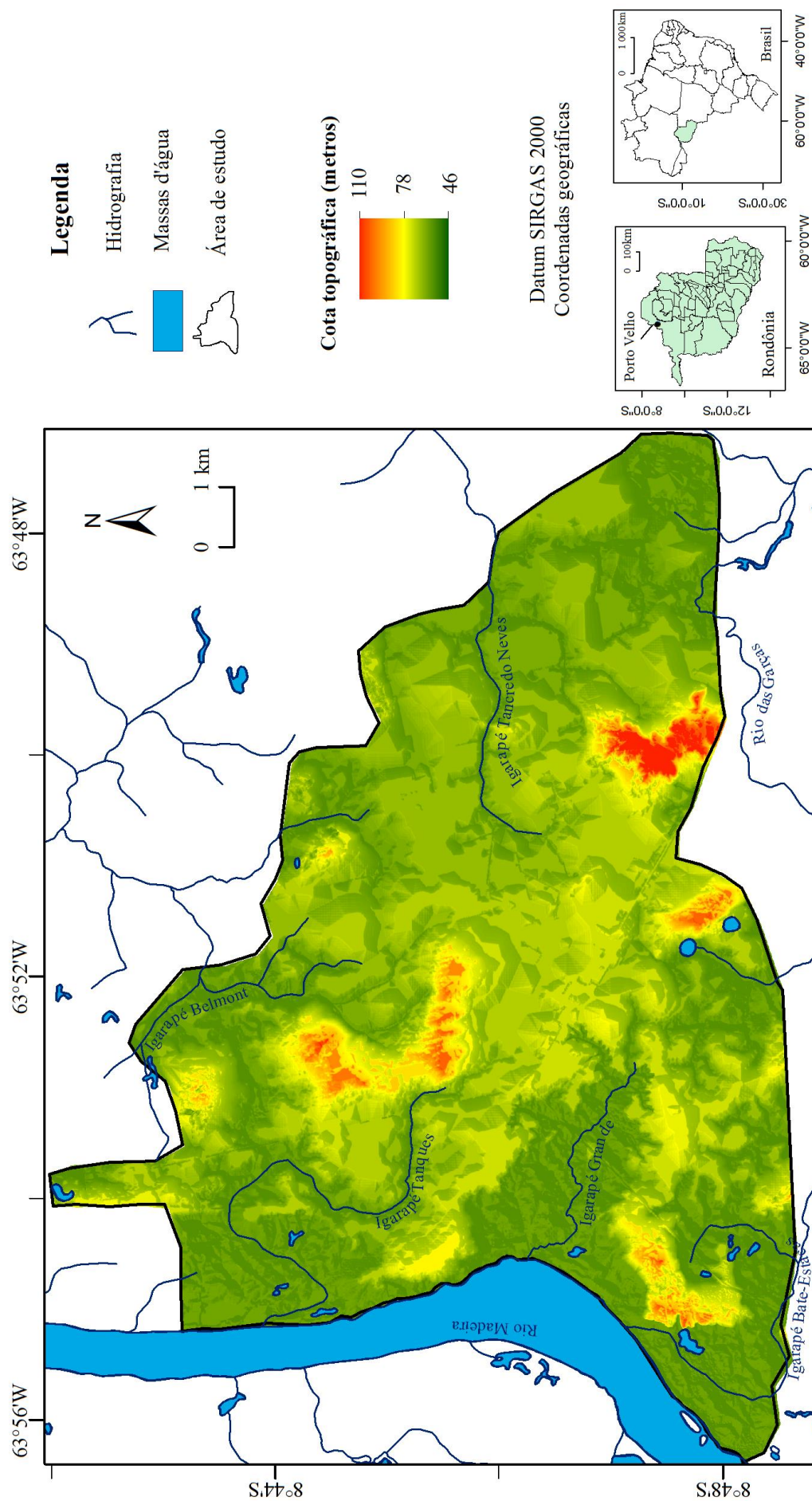
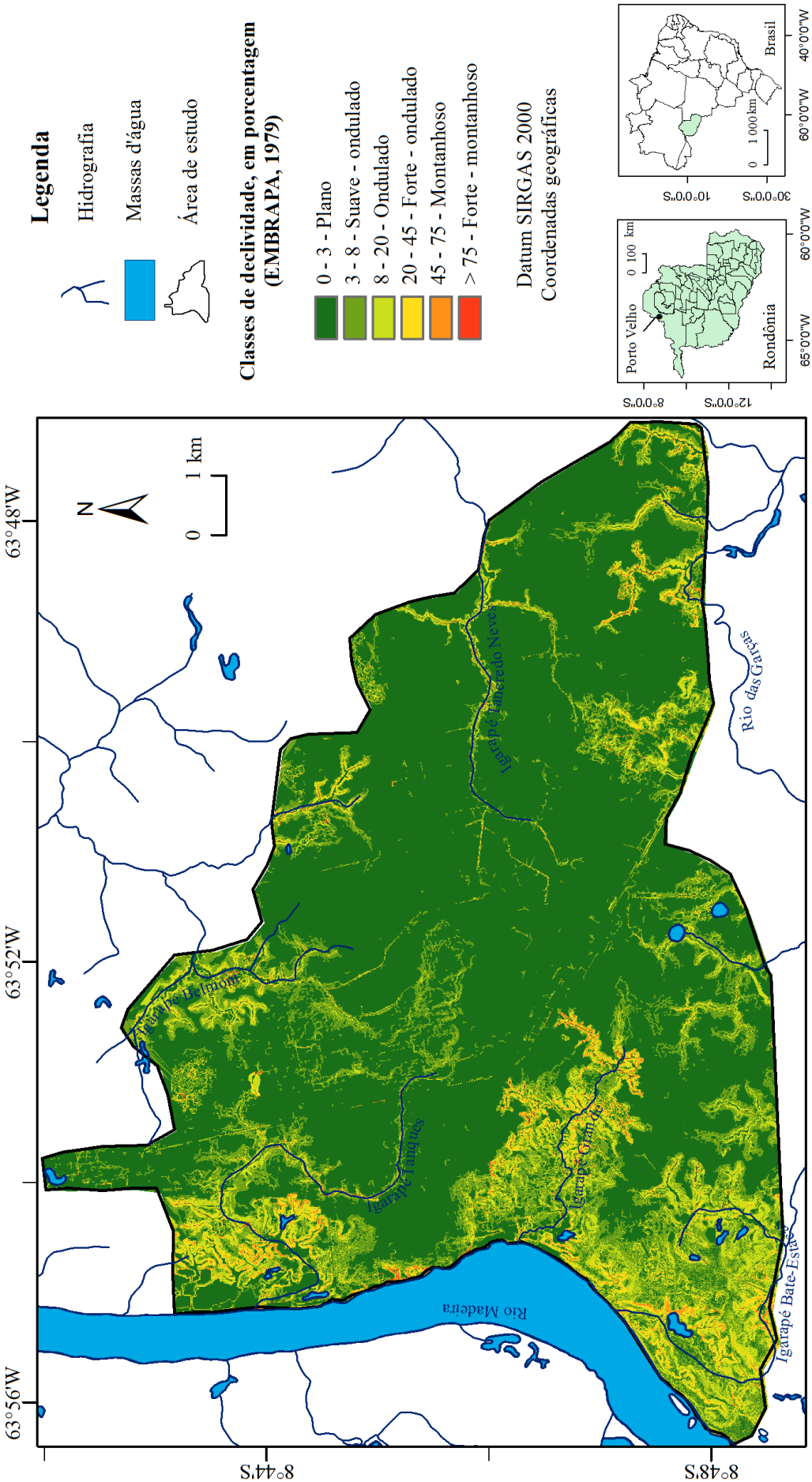




Figura 38 - Mapa de declividade da área de estudo.



## 6.2 HIDROGEOLOGIA

### 6.2.1 Arcabouço e composição do sistema aquífero poroso da área de estudo

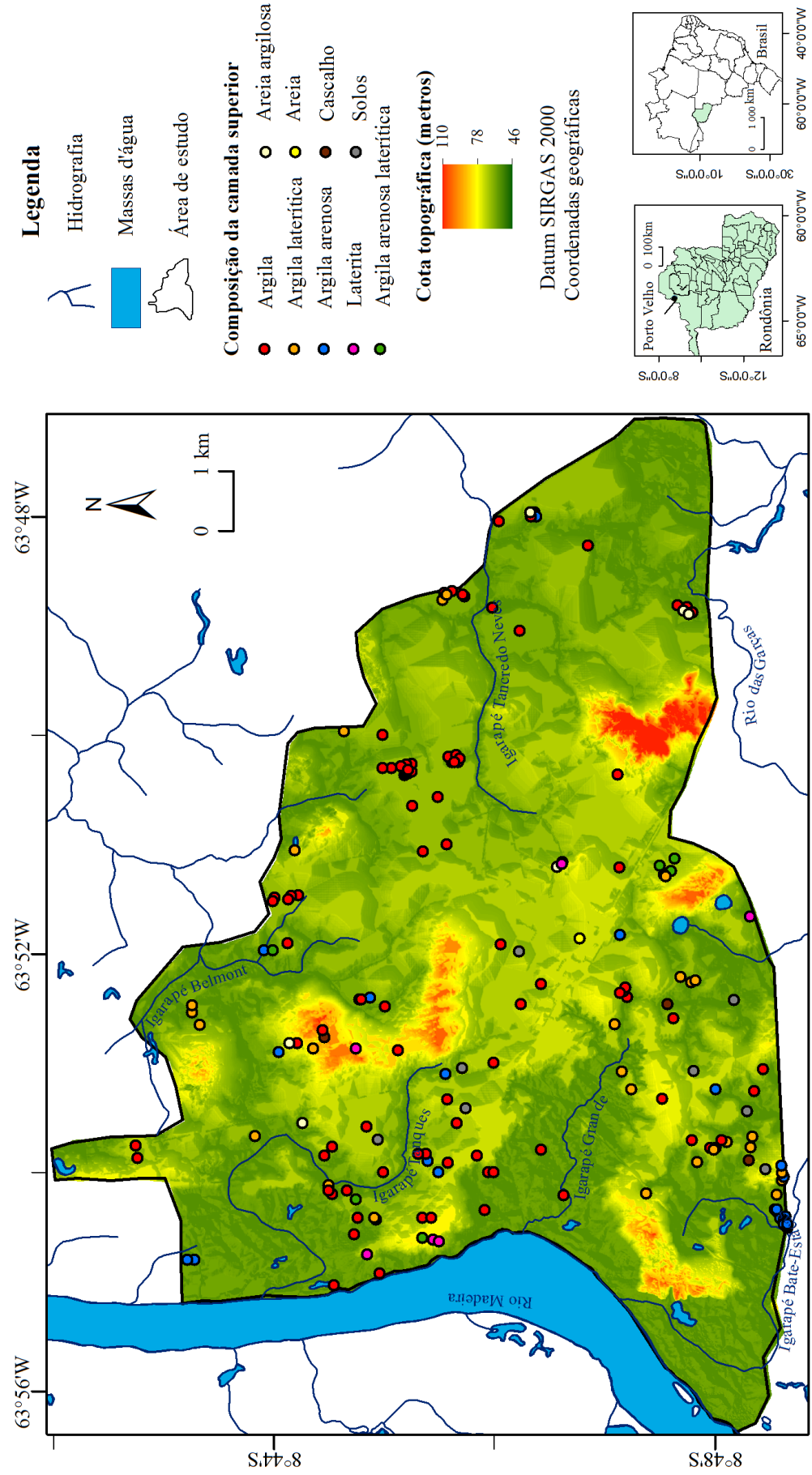
O sistema aquífero poroso da área de estudo é formado por camadas descontínuas de composição arenosa (aquíferos), intercalados verticalmente e lateralmente por um material de composição variada de menor permeabilidade (aquitardos), definindo-o como heterogêneo e anisotrópico. Esse depósito sedimentar (média de 61,8 metros de espessura) está disposto sobre o embasamento regional e é coberto predominantemente por uma camada argilosa a argilo-arenosa, conferindo um caráter semiconfinado ou areno-argilosa a arenosa de caráter livre. Além deste depósito sedimentar, ocorre localmente o desenvolvimento do perfil de laterítico, composto por argila a areia fina sobreposto por lateritas coesas e incoesas.

#### a) Camadas superficiais

Foi observado na descrição litoestratigráfica de 189 poços (**Figura 39**) que as camadas superiores do terreno da área de estudo são compostas por 52,9% de argila e os outros 47,1 % apresentam diferentes tipos de materiais, como argila com laterita, argila com areia, argila com areia e lateritas, areia com argila e silte, areia, cascalho (laterita incoesa) e solos não especificados.

As camadas de argila possuem 12,7 metros de espessura média e estão espalhadas por toda a área de estudo, desde as cotas altas até as baixas (média de 83,5 metros), principalmente na zona leste. As camadas compostas por argila com laterita; argila com areia e laterita; e laterita possuem uma espessura média de 10,1; 14,0 e 5,5 metros, respectivamente, e abrangem as cotas intermediárias a altas (média de 85,9 metros) e estão localizadas no sopé (argila com laterita; argila com areia e laterita), ou nos pontos mais altos (laterita) das elevações do terreno. Por outro lado, as camadas compostas por argila com areia, areia com argila e areia, possuem espessura média de 12,6; 6,8 e 1,5 metros, nesta ordem, e contemplam as cotas intermediárias a baixas (média de 82,6 metros). As camadas superiores, formadas por cascalhos, estão localizadas nas cotas baixas (média de 77,8 metros). Somente a descrição de um poço relata a granulação areia com 1,5 metro de espessura a 86,8 metros. Por fim, as camadas descritas como solos localizam-se na cota média de 85,0 metros, porém, sua granulação e composição não são descritas.

Figura 39 - Mapa de localização dos poços separados pela composição da camada superior da área de estudo.





A relação da espessura, composição, cotas topográficas e médias das camadas superficiais estão relacionadas na **Figura 40**.

O aumento da proporção de granulações finas (argila e silte) nos sedimentos do aquífero implica na diminuição da sua permeabilidade, pois são reduzidos os espaços vazios e suas conexões. Isto posto, o grupo de baixa permeabilidade reuniu as camadas compostas por argila, laterita, argila com laterita, argila com areia, argila com areia e laterita (incoesa) ou areia com argila/silte e contempla as cotas altas a baixas. O grupo de moderada a alta permeabilidade abrange as camadas de cascalhos ou areia e está localizado nas cotas intermediárias a baixas.

**Figura 40** - Quadro do levantamento de informações do memorial descritivo dos poços da granulação, espessura média, mínima e máxima da camada superior da área, além da classificação da unidade armazenadora, com base na porosidade e permeabilidade, Hiscock (2005).

Composição (Granulação)	Nº de poços	Espessura média (metros)	Espessura mínima (metros)	Espessura máxima (metros)	Cota média (metros)
Argila	100	12,7	1,0	68,0	83,5
Laterita	7	5,5	4,0	8,0	87,9
Argila com laterita	30	10,1	2,0	22,5	84,1
Argila com areia e laterita (incoesa)	6	14,0	5,0	28,0	85,7
Argila com areia	25	12,6	2,0	24,0	78,6
Areia com argila/silte	8	6,8	1,5	15,0	82,6
Areia	1	1,5	1,5	1,5	86,8
Cascalho	4	4,25	0,5	12,0	77,8
Solos	8	2,8	0,5	8,0	85,0
Total	189				

Conforme o mapa de solos da área de estudo (**Figura 11, p.28**), o material que compõe a camada superficial é o latossolo vermelho-amarelo distrófico, bem drenado e de textura argilosa (CAMARGO et al., 1987). Essa textura argilosa dos solos pode estar relacionada à argila do tipo caulinita, proveniente do intemperismo direto de feldspatos, as quais pertencem ao grupo das argilas 1:1 de baixa atividade, como sugerem Nascimento et al. (2012).

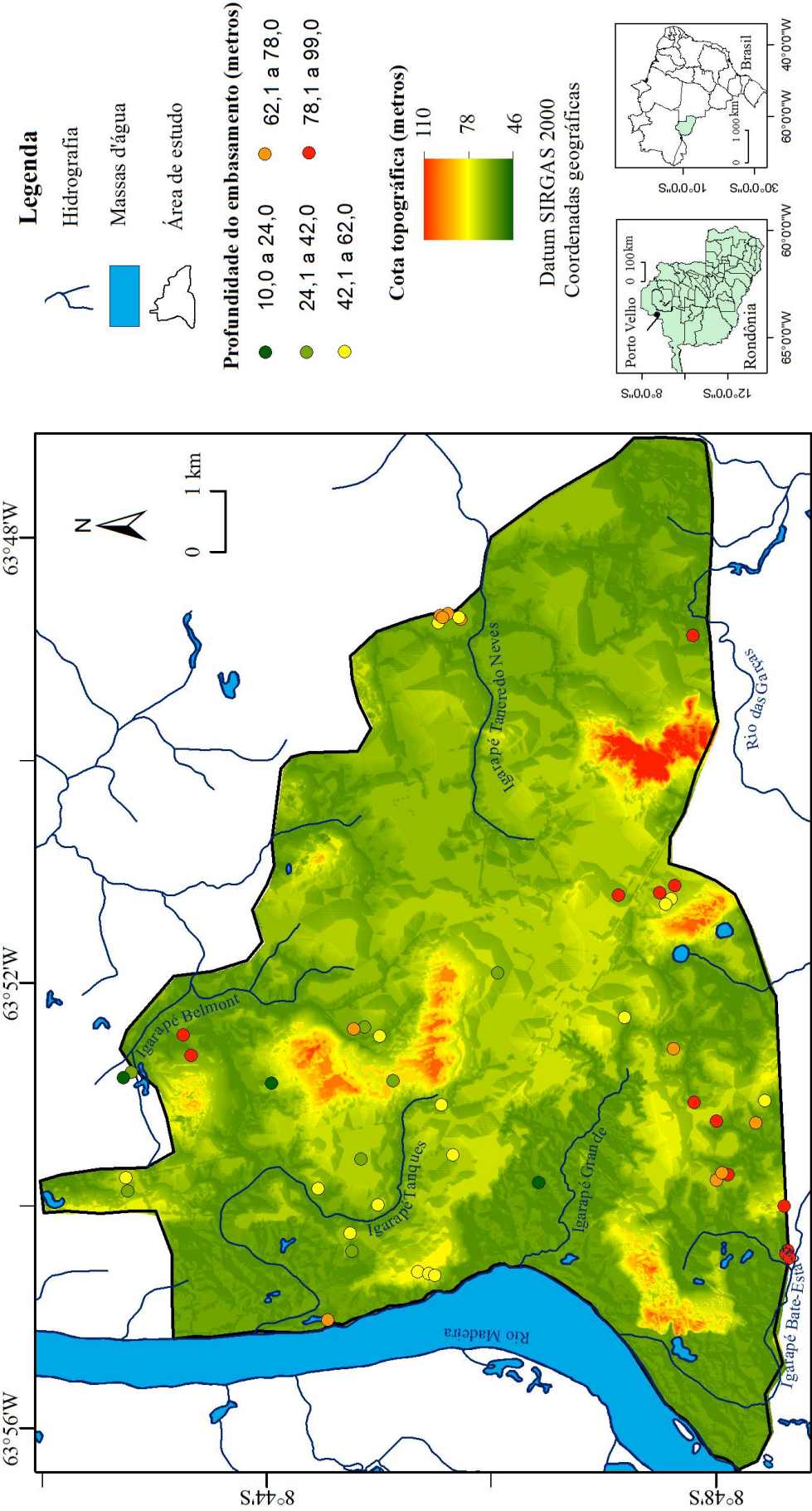
## b) Camadas aquíferas e aquitardos

Os aquíferos são porções com maior permeabilidade (CUSTODIO; LLAMAS, 1976; FETTER, 2001) e na área de estudo são compostos pelas frações areia com argila, areia fina até grossa, predominantemente, e restritas porções com cascalho, conforme. As camadas constituídas essencialmente pela fração areia fina a grossa possuem espessura média de 12,1 metros com máxima e mínima de 45 metros e 1,3 metro. Sua espessura acumulada média é de 17,6 metros com máxima e mínima de 74 e 2 metros. No entanto, considerando 48 dos 189 poços que interceptam o embasamento, suas camadas de areia possuem em média 13,9 metros de espessura (máxima 35 metros e mínima de 1,33 metros), em função da espessura acumulada de 22,6 metros em média (máxima de 56 metros e mínima de 3 metros). Há camadas de areia/cascalho que apresentam a fração argila/silte em sua composição, o que implica na diminuição de permeabilidade, denominados aquíferos pobres. Na área de estudo, elas são representadas pelas frações argila com areia e laterita (incoesa), argila com areia, areia com argila, laterita incoesa com argila e cascalho com areia e argila. Contudo, há locais com uma maior proporção de finos em relação aos grossos, implicando na diminuição da permeabilidade, denominadas aquitardos. Ainda, são representados por camadas compostas por argila, argila com areia ou laterita coesa e incoesas. E, em face à inexistência das proporções das frações granulométricas no memorial descritivo dos poços, as frações correspondentes à argila com areia podem ser enquadradas como aquíferos pobres ou aquitardes.

Algumas camadas formadas por cascalho com areia e argila apresentam-se, no memorial descritivo dos poços, caracterizadas como “lateríticos” e são associadas à argila de coloração vermelha. Diante desse fato, foram relacionadas com as lateritas incoesas, pois segundo Nascimento et al. (2012) elas contemplam a fração seixo, grânulo e areia (87,1%) e são envoltas por argila avermelhada (12,8%), de composição predominante de hematita e goethita (> 95%) e sua origem está relacionada ao desmantelamento da laterita coesa, na área de estudo. As outras camadas, representadas por frações argila/areia, podem estar relacionadas ao horizonte mosqueado composto por 60 a 70% das frações de argila e 30 a 40% da fração areia, seixo e grânulo, descrito pelos autores.



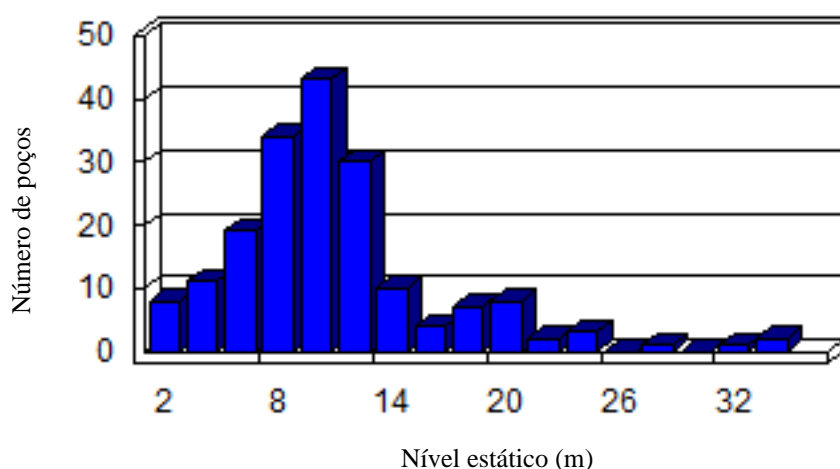
Figura 42 - Mapa de localização dos poços por profundidade do embasamento da área de estudo.



### 6.2.2 Parâmetros hidráulicos do aquífero poroso

Os níveis estáticos, com uma média de 11,4 metros de profundidade (**Figura 43**), variam de 2 a 35 metros conforme a localização no terreno (**Figura 44**). Os níveis mais rasos (2 a 10 metros) estão associados às menores cotas e próximos às drenagens, ou seja, onde a declividade é ligeiramente mais acentuada em relação às outras porções da área de estudo. Já os níveis mais profundos (15 a 35 metros) estão associados às cotas mais elevadas, onde a declividade é menos acentuada.

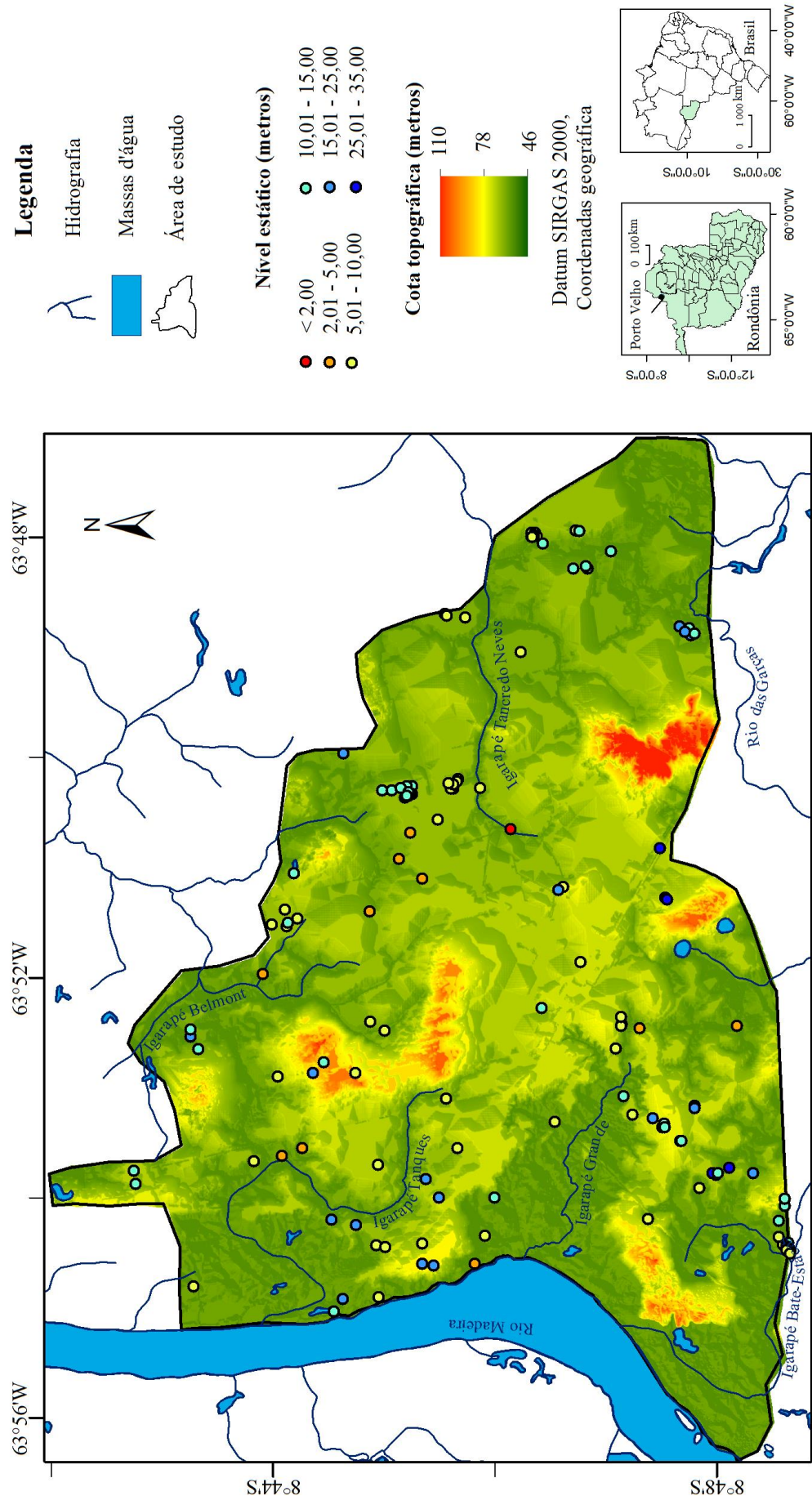
**Figura 43** - Relação entre número de poços e nível estático (metros).



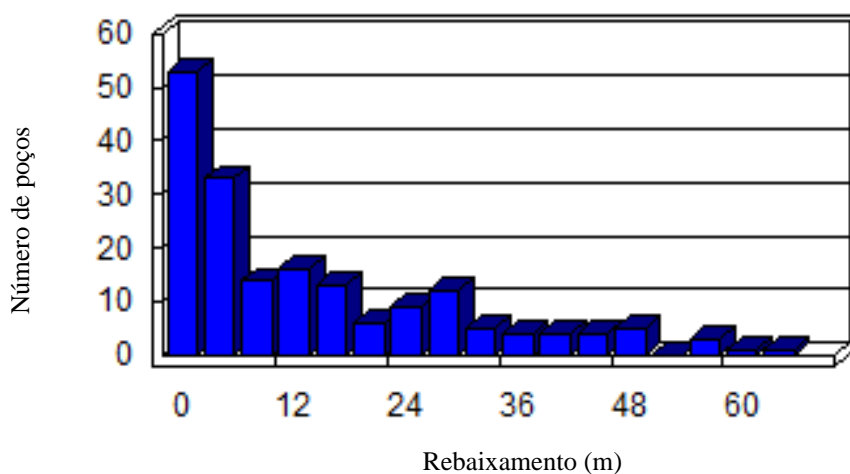
O rebaixamento variou de 0,7 a 67,8 metros, com média de 15,3 metros (**Figura 45**), resultado da diferença entre o nível estático com o nível dinâmico (média de 29,19 metros, mínima de 2,6 e máxima de 83 metros). Os maiores rebaixamentos situam-se na porção mais elevada da área de estudo e os menores nas cotas topográficas mais baixas, próximo às drenagens (**Figura 46**). A variação do nível estático e do rebaixamento da área de estudo pode ser ocasionada pela associação de fatores naturais como geologia, topográfica, precipitação e/ou fatores antrópicos como impermeabilização do solo ou excesso de exploração de água subterrânea.



Figura 44 - Mapa de localização dos poços por profundidade do nível estático da área de estudo.



**Figura 45** - Relação entre número de poços e rebaixamento (metros).



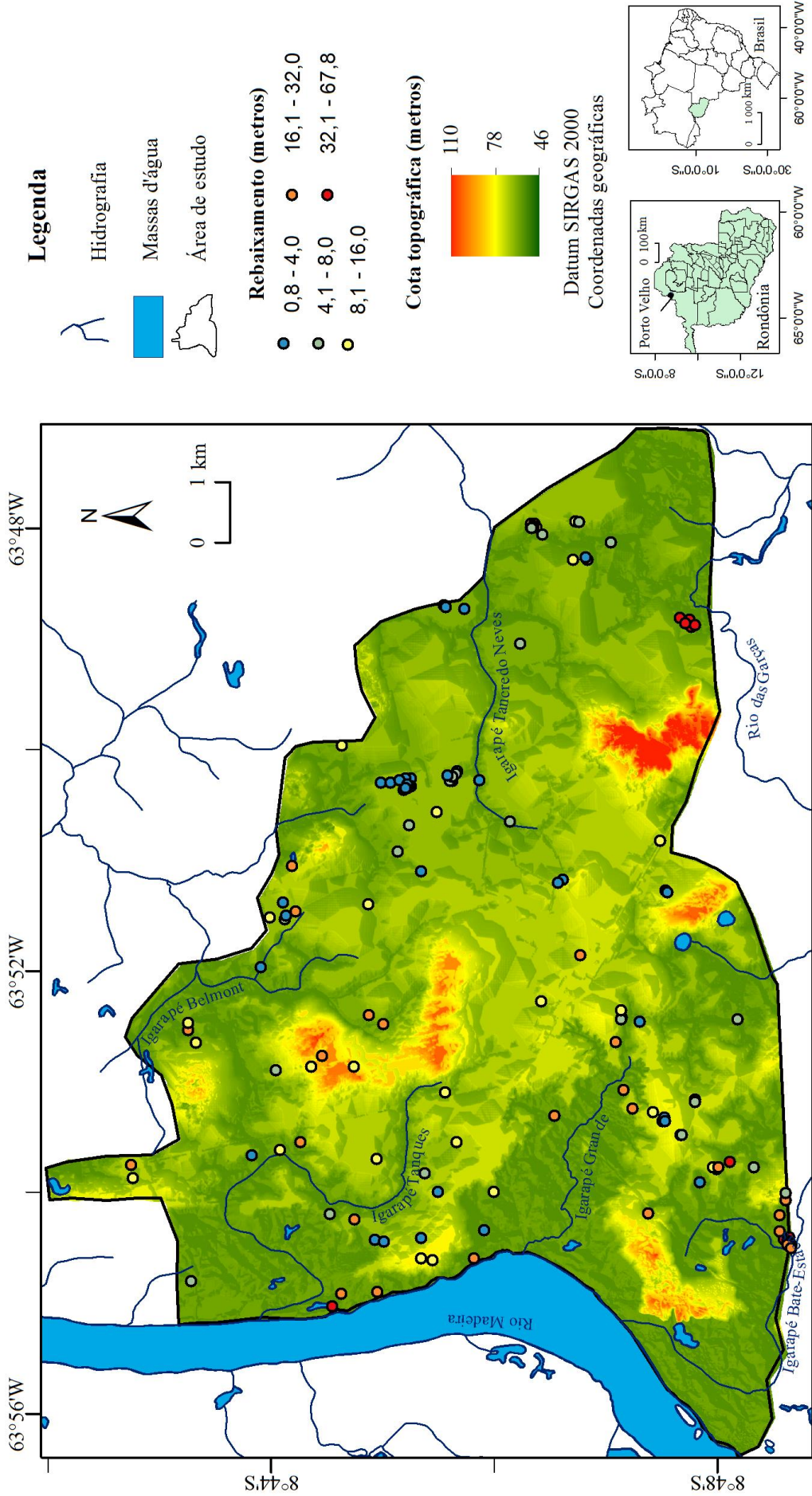
Considerando a média de  $4,82 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , a vazão específica variou de  $0,02$  a  $28 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  (**Figura 47**), com base no rebaixamento e na estabilização da vazão de bombeamento. As maiores vazões específicas ocorrem próximas às drenagens (**Figura 48**) e estão relacionadas às cotas menores de 88 metros, e as menores vazões específicas estão relacionadas às feições positivas com cotas superiores a 70 metros.

Os valores de vazão específica superiores a  $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  correspondem à produtividade alta a muito alta e contemplam cerca de 41,5% dos poços localizados nas menores cotas topográficas da área de estudo (**Figura 49**). O rebaixamento médio desses poços é inferior a 5,7 metros e nível estático médio menor que 10,3 metros, ou seja, são os menores valores da área de estudo para esses parâmetros hidráulicos.

Cerca de 29% dos poços estudados possuem produtividade baixa a moderada, correspondem às vazões específicas de  $0,4$  a  $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  e estão situados em cotas intermediárias. Exibem nível estático médio de 11,5 metros e rebaixamento médio de 12,9 a 21,8 metros.

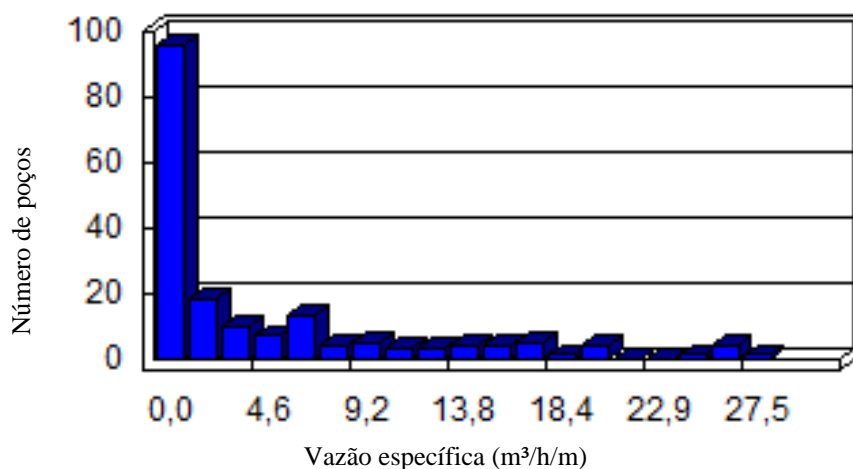
Os 30% dos poços restantes possuem vazões específicas menores que  $0,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ , correspondendo à produtividade baixa a muito baixa ou não aquífero e estão localizados onde a topografia é destacada por cotas acima de 60 metros. O nível estático médio variou de 12,35 a 19,25 metros e o rebaixamento médio de 33,8 metros, isto é, são os maiores valores da área de estudo para esses parâmetros hidráulicos.

Figura 46 - Mapa de localização dos poços por rebaixamento da área de estudo.





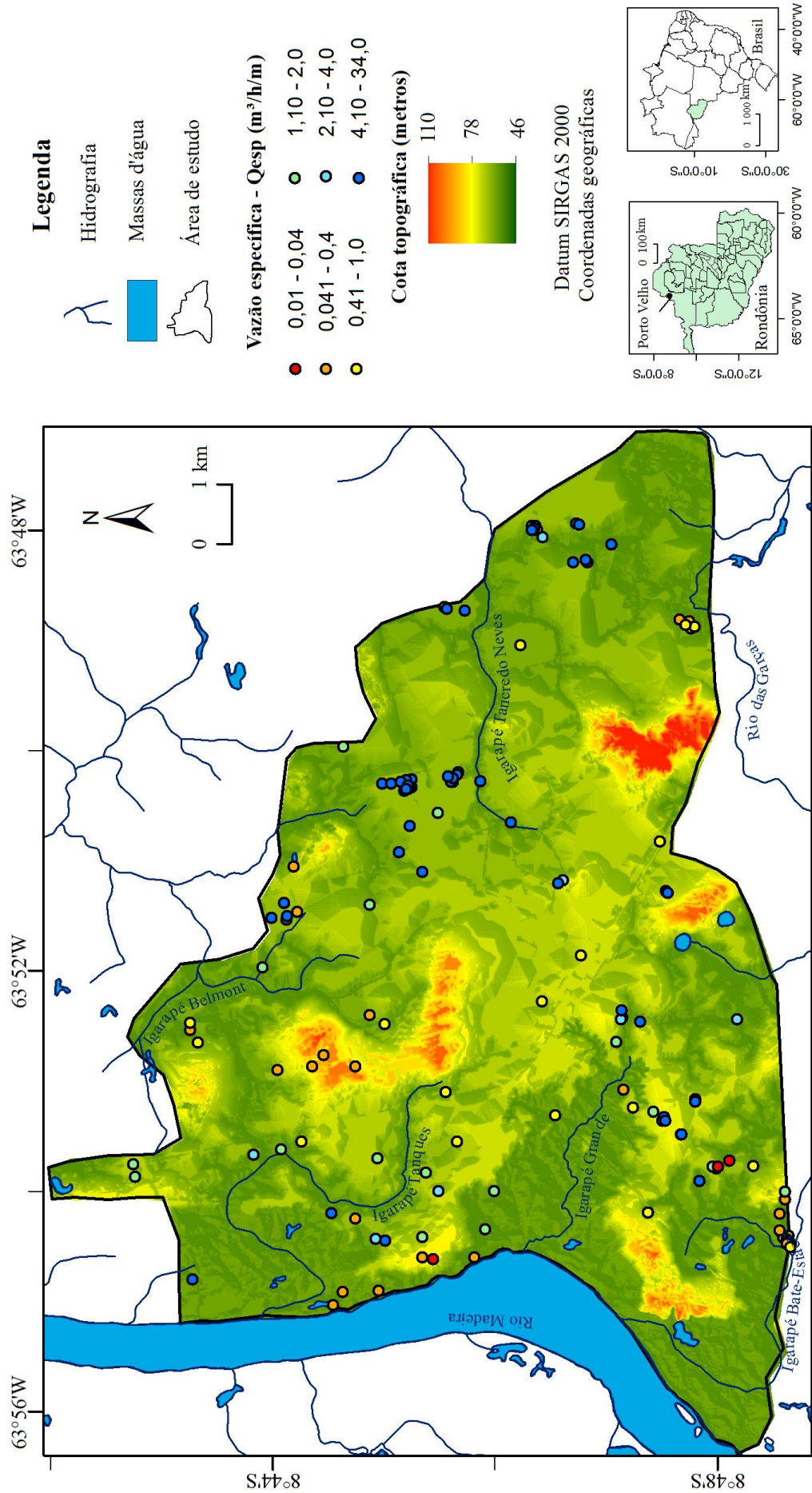
**Figura 47** - Gráfico relacionando o número de poços estudados e suas vazões específicas ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ ).



A condutividade hidráulica dos 16 poços analisados pelo método do Ponto de Inflexão de Hantush (**Apêndices G ao X**) variou de  $2,5 \times 10^{-4}$  a  $6,8 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  com média de  $2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  e a transmissividade com média de  $1,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , sendo seus valores mínimo e máximo de  $6,9 \times 10^{-5}$  e  $5,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (**Figura 50**). A composição das camadas aquíferas em questão varia de areia fina a grossa com espessura total de 3 a 28 metros (média de 14,3 metros). Custodio e Llamas (1976) e Fetter (2001) consideram que os poços interceptam aquíferos pobres a bons quando suas condutividades hidráulicas são menores e maiores que  $5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , nesta ordem (**Figura 51**).

Os aquíferos pobres apresentam associação às vazões específicas menores que  $7,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  e os aquíferos bons estão associados às vazões específicas maiores que  $8,8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . No entanto, há poços que apresentam condutividade hidráulica alta e vazões específicas baixas devido à presença de camadas de areia de menor espessura (3 a 6 metros).

Figura 48 - Mapa de localização dos poços por vazão específica da área de estudo.



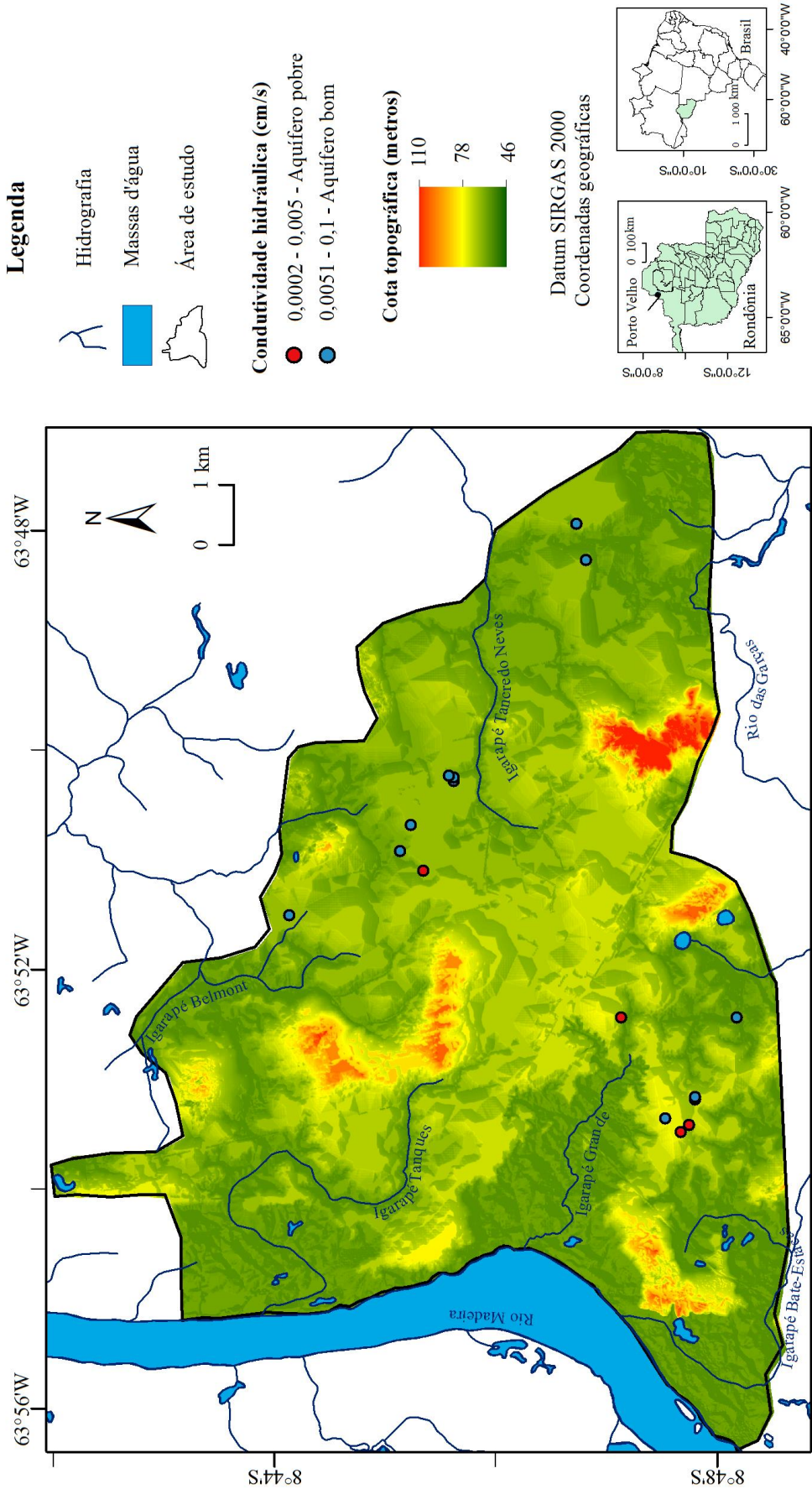
**Figura 49** - Quadro com a relação da produtividade dos poços segundo a classificação de Diniz et al. (2012).

<b>Nº de poços</b>	<b>Produtividade</b>	<b>Vazão Específica (m³/h/m)</b>	<b>Média do Nível Estático (m)</b>	<b>Média da Vazão (m³/h)</b>	<b>Média do Rebaixamento (m)</b>
64	Muito alta	$Q_{esp} \geq 4,0$	10,3	39,7	3,9
12	Alta	$2,0 \leq Q_{esp} < 4,0$	9,8	17,0	5,7
29	Moderada	$1,0 \leq Q_{esp} < 2,0$	11,1	17,7	12,9
24	Baixa (localmente moderada)	$0,4 \leq Q_{esp} < 1,0$	11,9	15,6	21,8
50	Baixa (localmente muito baixa)	$0,04 \leq Q_{esp} < 0,4$	12,3	6,0	32,3
4	Muito baixa ou não aquífero	$Q_{esp} < 0,04$	19,25	0,88	35,3
183	Total				

**Figura 50** - Quadro da relação da condutividade hidráulica (cm/s), tipo de aquífero, espessura da camada aquífera (m) e transmissividade (m<sup>2</sup>/s) dos poços com teste de bombeamento.

Poço	Condutividade hidráulica (cm/s)	Camada aquífera (m)	Transmissividade (m <sup>2</sup> /s)	Tipo de aquífero	Vazão específica (m <sup>3</sup> /h)
Conjunto Guajará	$1,65 \times 10^{-2}$	14,1	$2,3 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	15,0
PBS 1 - Pirâmide	$2,0 \times 10^{-2}$	28,0	$5,6 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	21,3
PBS 1 - Marcos Freire	$2,2 \times 10^{-2}$	14,3	$3,1 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	15,4
PBS 2 - RIII Tancredo Neves	$1,5 \times 10^{-2}$	16,0	$2,4 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	8,8
Conjunto Antares	$1,7 \times 10^{-3}$	18,0	$3,1 \times 10^{-4}$	Aquífero bom	16,6
PBS – Buritis	$2,6 \times 10^{-2}$	5,0	$1,3 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	6,6
PBS I SAA C. Lobo	$4,2 \times 10^{-2}$	3,0	$1,3 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	7,5
Conjunto Acapu	$1,0 \times 10^{-2}$	18,0	$1,8 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	11,4
PBS 1 - SAA Conjunto Rio Mamoré	$1,1 \times 10^{-2}$	5,0	$5,5 \times 10^{-4}$	Aquífero bom	3,4
PBS 2 SAA Ronaldo Aragão	$9,5 \times 10^{-3}$	13,5	$1,3 \times 10^{-3}$	Aquífero pobre	6,6
PBS 05 - Tancredo Neves	$2,5 \times 10^{-2}$	16,0	$4,0 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	20,5
PBS 29 Cohab I e II	$2,4 \times 10^{-3}$	13,0	$3,1 \times 10^{-4}$	Aquífero pobre	3,3
PBS 5 - Chagas Neto	$2,5 \times 10^{-4}$	28,0	$6,9 \times 10^{-5}$	Aquífero pobre	2,7
PBS 2 SAA do Lobo	$6,7 \times 10^{-2}$	3,0	$2,0 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	7,3
PBS 3 - Chagas Neto	$1,3 \times 10^{-3}$	28,0	$3,6 \times 10^{-4}$	Aquífero pobre	7,5
PBS 9 - Tancredo Neves	$5,0 \times 10^{-2}$	6,0	$3,0 \times 10^{-3}$	Aquífero bom	6,0

Figura 51 - Mapa de localização dos poços por condutividade hidráulica da área de estudo.



### 6.2.3 Fluxo de água subterrânea e áreas de recarga e descarga

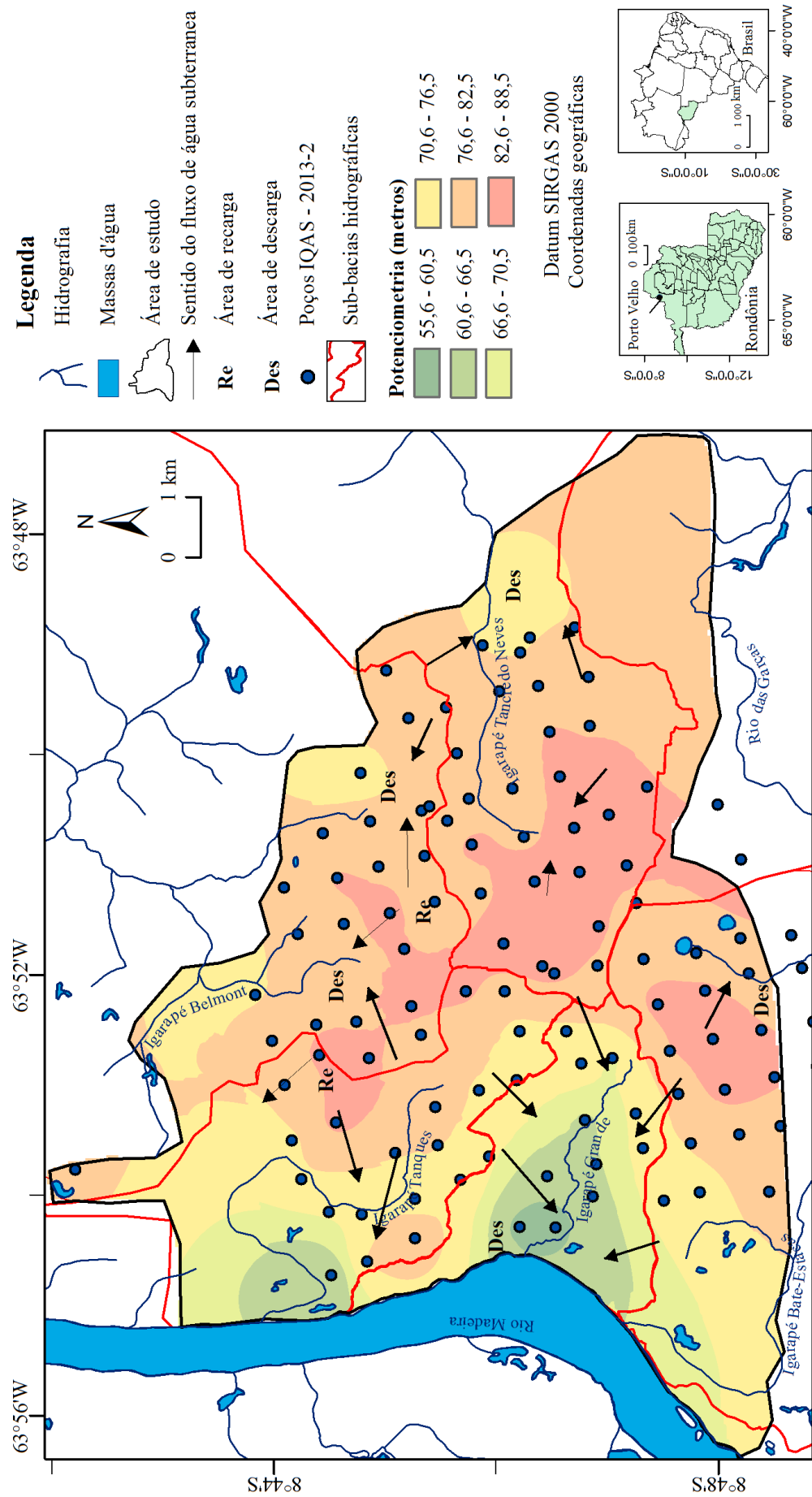
O nível potenciométrico da área de estudo variou de 55,6 a 88,5 metros (**Figura 52**), e os maiores valores situam-se na porção central perfazendo uma feição alongada de direção NE-SW. Ocorrem, conjuntamente, duas feições concêntricas com valores elevados para o nível potenciométrico na porção oeste e sul da área de estudo. O nível potenciométrico acompanha a topografia visto que os níveis elevados estão localizados nos altos topográficos formados pelo perfil laterítico, e os níveis baixos estão localizados nos baixos topográficos, próximos das drenagens. Os divisores potenciométricos exibem coincidência com os divisores topográficos, principalmente entre as sub-bacias Tanques com Belmonte, Tanques com Tancredo Neves, Tanques com Grande e Belmont com Tancredo Neves. O nível potenciométrico diminui gradativamente em direção às bordas da área de estudo, para o sentido oeste, norte e leste, onde os menores valores estão localizados próximos aos igarapés Grande e Tanques, na porção sudoeste e noroeste, respectivamente.

Os fluxos de água subterrânea se apresentam de modo divergente do centro para oeste - sentido rio Madeira, e para leste - sentido rio Cadeias, e, localmente, convergem para os igarapés Tanques, Belmont, Tancredo Neves, Bate Estacas e Grande.

Por meio da análise do nível potenciométrico e de fluxo subterrâneo percebe-se que as áreas de recarga estão localizadas principalmente na porção central da área de estudo, onde o nível potenciométrico se mostra elevado e o fluxo divergente. São porções do terreno situadas nos altos topográficos entre as sub-bacias hidrográficas Tanques e Belmont, Tanques e Grande, bem como na porção oeste da sub-bacia hidrográfica Tancredo Neves, e a noroeste da sub-bacia hidrográfica Bate Estacas. As áreas de descarga estão situadas nos menores valores potenciométricos (fluxo convergente), localizam-se nos baixos topográficos como, por exemplo, no sentido dos igarapés Tanques, Belmont, Tancredo Neves e Bate Estacas, e são evidenciadas por feições interdidadas à montante.



Figura 52 - Mapa potenciométrico e de fluxo subterrâneo da área de estudo.



### 6.2.4 Recarga direta

#### a) Método da flutuação da superfície livre

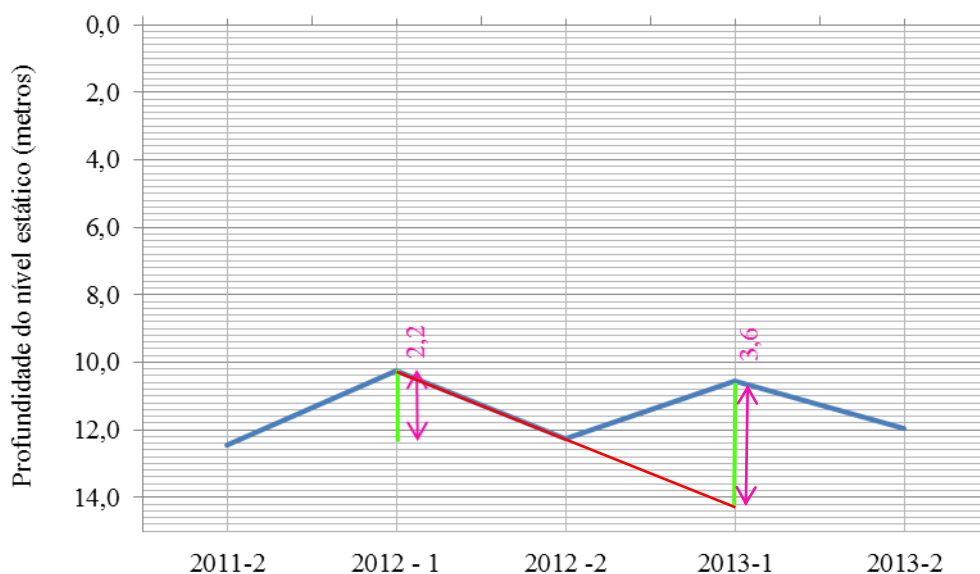
Os poços analisados exibiram o nível estático médio de 7,3 metros com máxima de 11,5 metros e mínima de 2,6 metros, no intervalo de tempo analisado de outubro de 2011 a outubro de 2013 (**Figura 53**). São poços perfurados em cotas que variam de 60,5 a 87,1 metros e possuem profundidade de 30 a 75 metros.

**Figura 53** - Quadro da relação do nível estático (2011-2 a 2013-2) e média, profundidade e cota dos poços.

NE (m) Poço	2011-2	2012-1	2012-2	2013-1	2013-2	Média	Prof. (m)	Cota (m)
JR 006 - 54	12,45	10,25	12,25	10,56	11,95	11,5	42,0	87,1
JR 004 - 38	2,3	1,30	2,65	1,6	5,0	2,6	75,0	60,5
JQ 991 - 41	11,1	9,0	11,25	9,7	10,90	10,4	42,9	86,1
JQ 928 - 24	7,0	4,0	6,0	3,5	5,5	5,2	30,0	86,1
Média total						7,3		

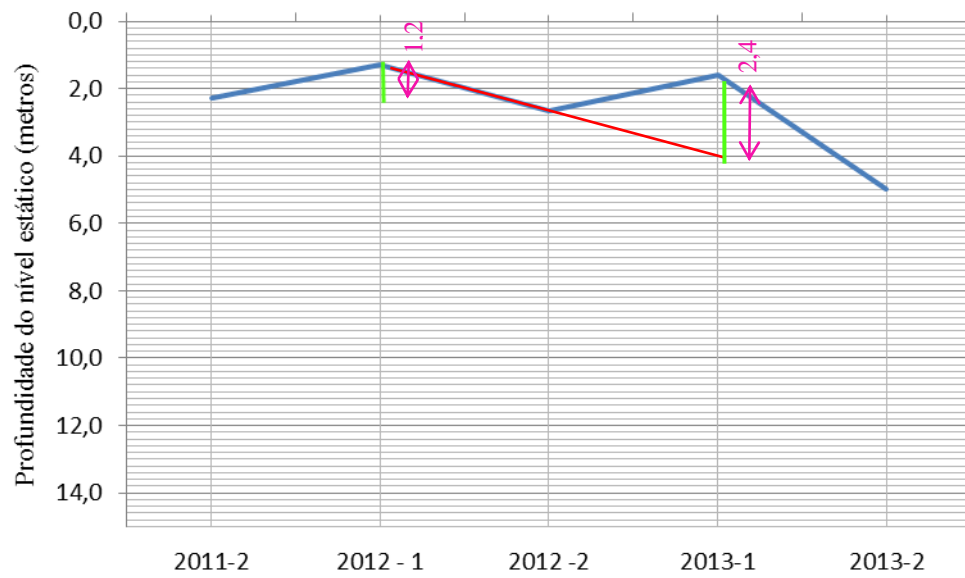
Com os dados de nível estático para o período de 2011-2 a 2013-2, deste quadro, foram gerados os gráficos das **Figuras 54, 55, 56 e 57** para a análise da curva de recessão (em vermelho), representada pela extrapolação do nível estático caso o aquífero não fosse abastecido.

**Figura 54** - Gráfico de variação do nível estático para o poço JR 006-54.

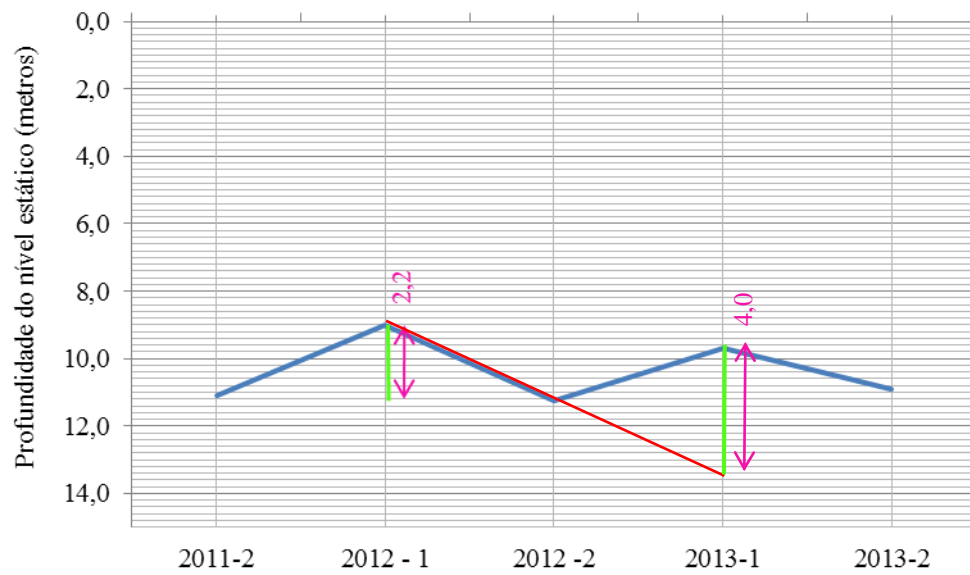


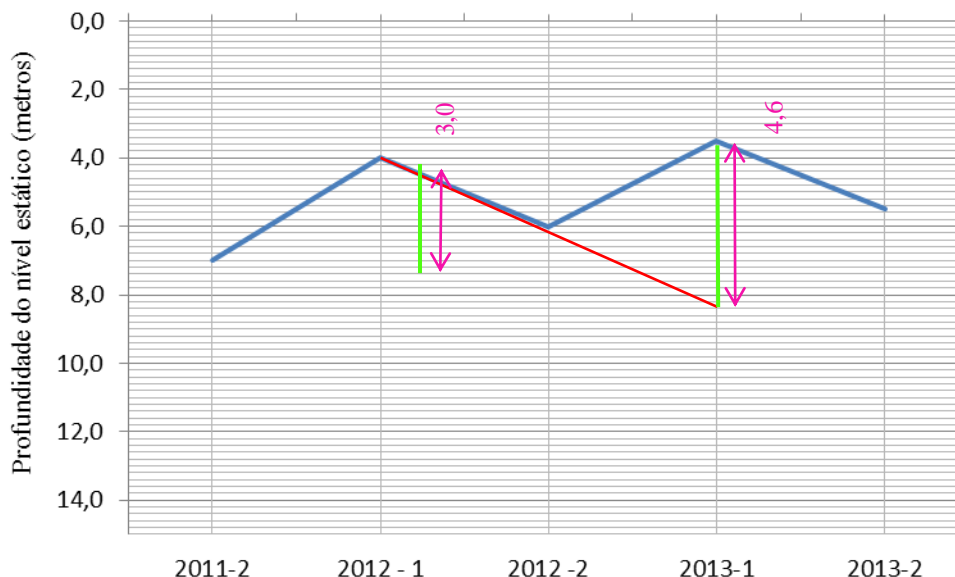


**Figura 55** - Gráfico de variação do nível estático para o poço JR 004 – 38.



**Figura 56** - Gráfico de variação do nível estático para o poço JQ 991- 41.



**Figura 57** - Gráfico de variação do nível estático para o poço JQ 928 - 24.

Para cada poço estudado foi somada a variação do nível estático, medido a partir da distância entre o pico de subida do nível estático e o seu ponto correspondente na curva de recessão. O período de 2011-2 a 2013-1 apresentou a média do somatório total da variação do nível estático de cada poço (**Figura 58**) de 5.520 mm, além da maior variação no poço JQ 928 - 24 (7.600 mm), localizado na sub-bacia Belmont, e a menor no poço JQ 004 - 38 (3.600 mm), localizado na sub-bacia Grande.

**Figura 58** - Quadro da relação de poços e resultado da recarga direta.

Poço	Cota (m)	Granulação	Sy (máx)	Δh (mm)	Δt (anos)	Rd (mm/ano)	Rd (%) da precipitação
JR 006 - 54	87,1	Argila	0,05	5.800,0	1,5	193,3	8,2
		Argila com areia	0,12			464,0	19,8
JQ 991 - 41	86,1	Argila	0,05	6.200,0	1,5	206,7	8,8
		Argila com areia	0,12			496,0	21,1
JQ 928 - 24	86,1	Argila	0,05	7.600,0	1,5	253,3	10,8
		Argila com areia	0,12			608,0	25,9
JR 004 - 38	60,5	Argila com areia	0,12	3.600,0	1,5	288,0	12,3
Média				5.520,0	1,5		
Precipitação de 10/2011 a 03/2013				3.521,6		2.347,7	100

Em função dos poços estarem localizados em cotas topográficas diferentes (**Figura 59**), maiores variações de nível estático foram verificadas nas cotas elevadas, e menores, nas baixas. Isto pode estar relacionado com a variação da precipitação na sub-bacia hidrográfica onde os poços estão inseridos ou pela composição mais permeável das camadas em menor cota topográfica e materiais menos permeáveis nas maiores cotas.

O rendimento específico ( $S_y$ ) foi estimado com base na correlação entre o estudo de Johnson (1967) com a composição granulométrica (estratigrafia) interceptada pelo poço onde ocorreu a variação do nível estático. Logo, estas porções são compostas por argila (JR 006-54, JQ 991-41, JQ 928-24) e argila com areia (JR 004-24). A fração argila possui um  $S_y$  de 0,02 (médio), de 0,0 (mínimo), e de 0,05 (máximo). A fração argila com areia tem um  $S_y$  de 0,07 (médio), 0,03 (mínimo), e 0,12 (máxima), em concordância com Johnson (1967).

As recargas diretas ( $R_d$ ) máximas para o rendimento específico máximo ( $S_y$  máx) de 0,05 (fração argila) exibiu valor e 193,3 mm/ano (JR 006-54); 206,7 mm/ano (JQ 991-41); 253,3 mm/ano (JQ 928-24). Para o  $S_y$  igual a 0,12 (JR 004 – 38), a recarga direta mostrou o valor de 288 mm/ano (JR 004-38).

No entanto, estas porções compostas somente por argila podem conter, inclusive, um teor de silte e/ou areia fina perceptível por uma análise mais detalhada que poderia implicar no aumento do rendimento específico maior que 0,05. A gênese desses sedimentos pode estar relacionada à lixiviação de materiais lateríticos.

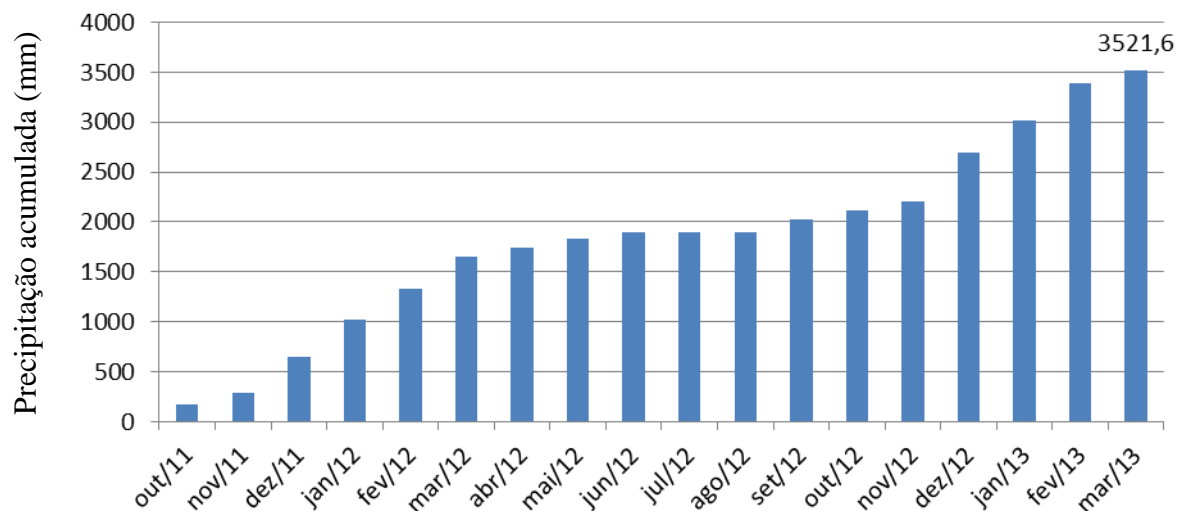
A precipitação acumulada para o período de outubro de 2011 a março de 2013 apresentou o valor de 3.521,6 mm, o que equivaleria a 2.347,7 mm/ano (**Figura 60**).

Em relação à precipitação (2.347,7 mm/ano), os valores percentuais da recarga direta foram 8,2 % (JR 006 – 54); 8,8% (JQ 991 – 41); 10,8 % (JQ 928 – 24), referentes às porções dos terrenos constituídos por argila, e 12,3 % (JR 004 – 38), para as porções compostas por argila com areia. Por conseguinte, a porcentagem da recarga direta ( $R_d$ ) máxima média corresponderia a 10,0% (234,7 mm/ano) da precipitação total para o período de um ano (2.347,7 mm/ano).

Contudo, caso se considere a composição argila com areia para todos esses poços, o percentual da recarga direta do aquífero aumenta para 19,8 % (JR 006 – 54); 21,1% (JQ 991 – 41); a 25,9% (JQ 928 – 24), com média de 19,8%, em relação à precipitação.

Destarte, os 90% (ou 80,2% considerando o rendimento específico igual a 0,12 para todas as camadas) restantes podem corresponder ao escoamento superficial, que abastece os igarapés e os rios do entorno, e à evapotranspiração, ambos componentes do balanço hídrico.



**Figura 60** - Precipitação acumulada para o período de outubro de 2011 a março de 2013 (RONDÔNIA, 2015).

### 6.3 HIDROGEOQUÍMICA

#### 6.3.1 Balanço iônico

Para a classificação do tipo de água subterrânea no Diagrama de Piper, dos 93 poços, apenas 8 deles (**Figura 61**) foram utilizados, pois seu coeficiente de erro se apresentou igual ou menor que 10% (FEITOSA et al., 2008).

**Figura 61** - Quadro da relação de poços e seus coeficientes de erro da análise.

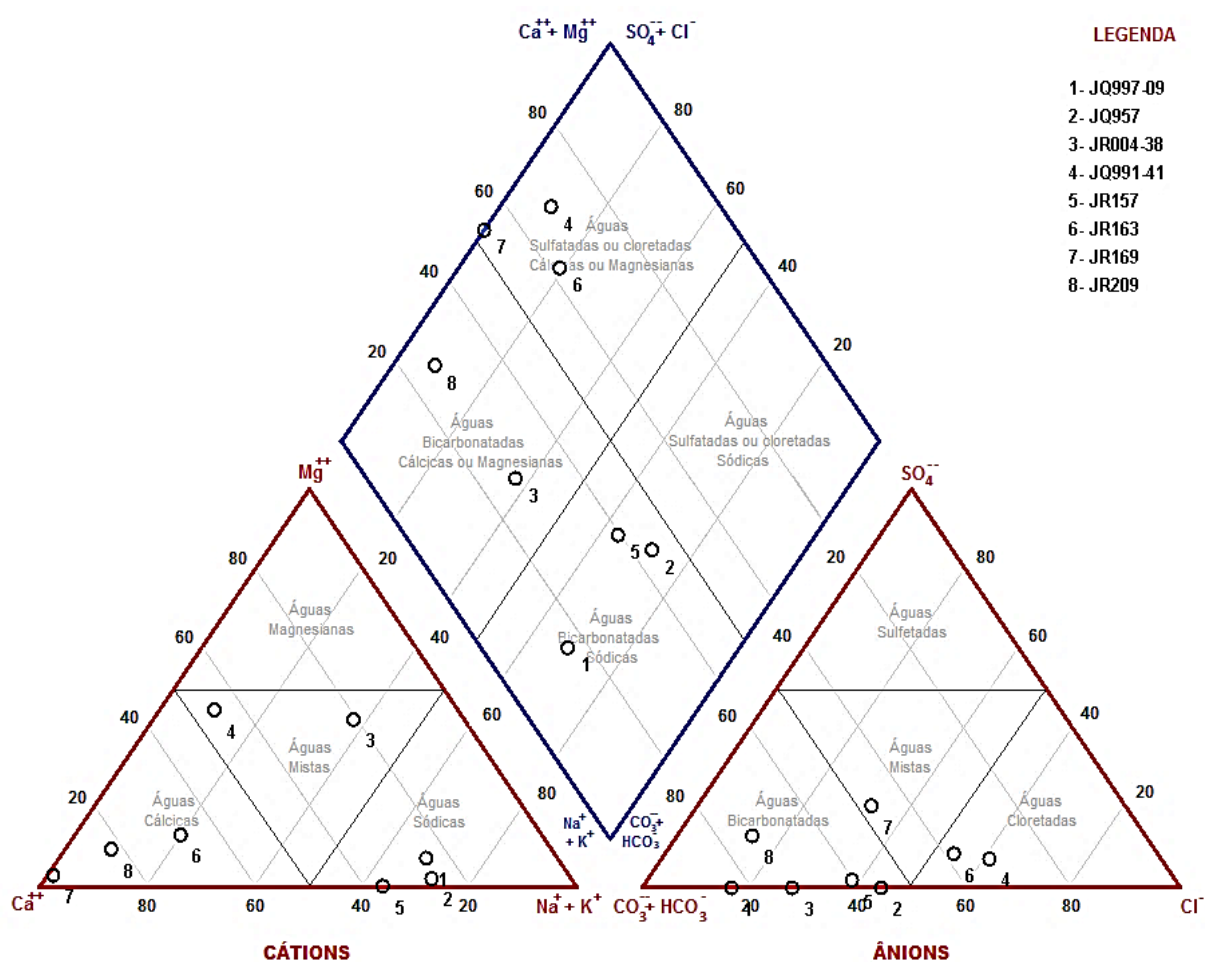
Poço	Coeficiente de erro da análise (%)
JR169	0,27627
JR157	3,72186
JQ991-41	4,83463
JR004-38	5,29063
JR163	5,80309
JQ997-09	6,70942
POSTO VIP-31(JQ957)	8,40635
JR209	9,76300

Considerando-se que as outras amostras tiveram o coeficiente de erro maior que 10% ocasionadas pela presença de íons na água subterrânea com elevada concentração, como o ferro e o nitrato, ou pela ausência de outros elementos em alta concentração que não foram analisados, pois são desnecessários para a classificação no Diagrama de Piper.

### 6.3.2 Classificação no Diagrama de Piper

As assinaturas geoquímicas das águas subterrâneas da área de estudo, de acordo com o Diagrama de Piper, foram heterogêneas, o que possibilitou identificar os seguintes grupos: bicarbonatadas sódicas (37,8%), sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas (37,8%), bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (25%), **Figuras 62 e 63**.

**Figura 62** - Classificação da água subterrânea da área de estudo no Diagrama de Piper.



**Figura 63** - Quadro da relação de poços com a concentração mg/L dos principais íons.

	Poço	Na + K	Ca	Mg	Cl	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	BI	Classificação
1	JQ997-09	8,91	2,80	0,52	5,32	47,00	0,00	6,7	Bicarbonatada sódica
2	JQ957	13,86	4,40	0,24	15,62	33,92	0,00	8,4	Bicarbonatada sódica
3	JR004-38	9,71	4,72	5,90	12,42	56,10	0,00	5,3	Bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas
4	JQ991-41	1,67	6,80	4,08	17,75	16,02	2,88	4,8	Sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas
5	JR157	11,12	5,52	0,04	11,00	30,17	0,77	3,7	Bicarbonatada sódica
6	JR163	5,21	16,00	1,92	25,20	30,72	5,48	5,8	Sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas
7	JR169	0,12	24,00	0,48	14,20	36,00	12,41	0,3	Sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas
8	JR209	1,12	10,00	0,72	3,55	33,00	4,65	9,8	Bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas

### 6.3.3 Características e origem dos íons da água subterrânea

A concentração de hidrogênio em solução expressada pelo potencial hidrogeniônico (pH) possui dependência do equilíbrio entre os íons controlada pelas reações químicas (FEITOSA et al., 2008). O desequilíbrio entre os íons de H<sup>+</sup> e do OH<sup>-</sup> expressa a acidez (pH < 7) ou a alcalinidade (pH > 7) ou, ainda, a neutralidade (pH = 7) de um sistema aquoso (LICHT, 1998).

A água ao entrar em contato com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), forma o ácido carbônico que a torna ácida, com pH próximo a 5,6 (CARVALHO JÚNIOR, 2004). Este ácido é dissociado em bicarbonato, conforme a relação a seguir (VAITSMAN; VAITSMAN, 2005):



O CO<sub>2</sub> pode estar disponível por processos naturais, em solos e sedimentos devido à decomposição da matéria orgânica; ou por processos antrópicos quando em concentrações elevadas, pela emissão do mesmo na atmosfera por indústrias ou queimadas (FORNARO, 2006). Devido a esses processos, a maioria das águas subterrâneas tem pH entre 5,5 e 8,5 (FEITOSA et al., 2008). Consoante os autores, o aumento do pH das águas subterrâneas

também pode ter causa antrópica ou natural, como por exemplo, pela contaminação por detergente e sabões (bases) ou pelo distanciamento da área de recarga em relação ao poço.

A disponibilidade dos elementos químicos na água subterrânea depende de muitos fatores, dentre eles o valor do pH do meio e do pH de hidrólise dos elementos. Quando o meio tem pH igual ou maior que o pH de hidrólise, para um determinado elemento, este é precipitado no ambiente (LICHT, 1998). Segundo o autor, isto ocorre com o  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$  que são móveis apenas em pH menores que 2 e 5, neste ordem. Por consequência, águas com pH menores que 5 podem lixiviar solos, sedimentos ou rochas com ferro, aumentando a quantidade deste íon na água subterrânea. As concentrações elevadas de ferro podem implicar na formação de manchas em instalações sanitárias e roupas, incrustação em tubulações e filtros de poços, além da mudança de gosto da água (ANA, 2005). Além disso, as concentrações de ferro acima de 0,3 mg/L e pH abaixo de 6 não são indicadas para o consumo humano, conforme a Portaria nº 1496/2000 (BRASIL, 2000).

Na área de estudo, o pH exibe variações em seus valores de 3,9 a 7,25 com uma média de 5,3 para o ano de 2013. São águas subterrâneas, portanto, consideradas ácidas, predominantemente. Por outro lado, o ferro apresenta variações de concentrações de 0 a 2,75 mg/L, com média de 0,17 mg/L. Com isso, a presença de  $\text{Fe}^{2+}$  em maior concentração que 0,3 mg/L pode ser ocasionado pelos valores de pH inferiores a 5, presentes na área de estudo, como menciona Licht (1998).

A origem do ferro na água subterrânea pode estar relacionada à lixiviação de lateritas coesas e incoesas que são constituídas, de acordo com Nascimento et al. (2012), por 95% de matriz ferruginosa (hematita, coloração vermelha e goethita, coloração amarela) na área de estudo. Da mesma forma, o intemperismo químico de rochas ricas em minerais como biotita e hornblenda pode disponibilizar este íon. O  $\text{Fe}^{3+}$  contido na hematita e goethita pode reduzir para  $\text{Fe}^{2+}$ , em meio redutor e pH menor que 5, conforme Licht (1998). Logo, o  $\text{Fe}^{2+}$  passará a fazer parte da composição das águas subterrâneas por ser a forma mais móvel deste íon (carga iônica menor e maior raio iônico).

A média e os valores máximos de outros íons como bicarbonato, cálcio, fluoreto, magnésio, manganês, potássio, sódio e sulfato estão dentro dos limites estabelecidos pela Portaria nº 1.496/2000 (BRASIL, 2000) e dos padrões encontrados nas águas subterrâneas (FEITOSA et al., 2008), **Figura 64**.



**Figura 64** - Quadro da concentração (mg/L) média e máxima dos principais íons dos poços analisados e sua concentração padrão encontrada nas águas subterrâneas, conforme a Feitosa et al. (2008).

	<b>Concentração média (mg/L)</b>	<b>Concentração máxima (mg/L)</b>	<b>Padrões encontrados nas águas subterrâneas (mg/L)</b>
<b>Ferro</b>	0,2	2,5	<0,3
<b>Manganês</b>	0,009	0,06	< 0,2
<b>Sulfato</b>	5,6	53,9	<100,0
<b>Cálcio</b>	5,6	40,0	10,0 - 100,0
<b>Magnésio</b>	1,9	18,2	1,0 - 40,0
<b>Sódio</b>	2,8	29,7	1,0 -100,0
<b>Potássio</b>	0,01	0,05	0,1 - 5,0
<b>Bicarbonato</b>	33,5	62	50,0 -350,0
<b>Fluoreto</b>	0,08	0,6	0,1 - 10,0
<b>Nitrato</b>	60,6	487,4	0,1 - 10,0
<b>Cloreto</b>	15,0	49,7	< 100,0

A origem desses íons pode estar ligada à lixiviação de minerais reliquias de microclínio e plagioclásio presentes nas lateritas (NASCIMENTO et al., 2012), ou mesmo do intemperismo das rochas que constituem o embasamento regional. Este pode referir-se à unidade da Suíte Providência (1,55 Ga), formada por granitoides (QUADROS; RIZZOTTO, 2007) compostos por biotita sienogranito porfirítico, hornblenda - biotita monzogranito e quartzo sienito (BETTENCOURT et al., 1999). Ou pode estar relacionado à Suíte Intrusiva Santo Antônio (1,2 Ga), formada por biotita monzogranito grosso, sienogranito e biotita monzogranito equigranular médio, além de diques de pegmatitos e aplitos, rochas híbridas e diques (PAYOLLA, 1994).

Os íons são retirados desses minerais pela ação da água possibilitando a geração de relictos como nódulos de silicato de alumínio hidratado e caulinita que, conforme Nascimento et al. (2012), compõem aproximadamente 10% do horizonte ferruginoso do perfil laterítico.

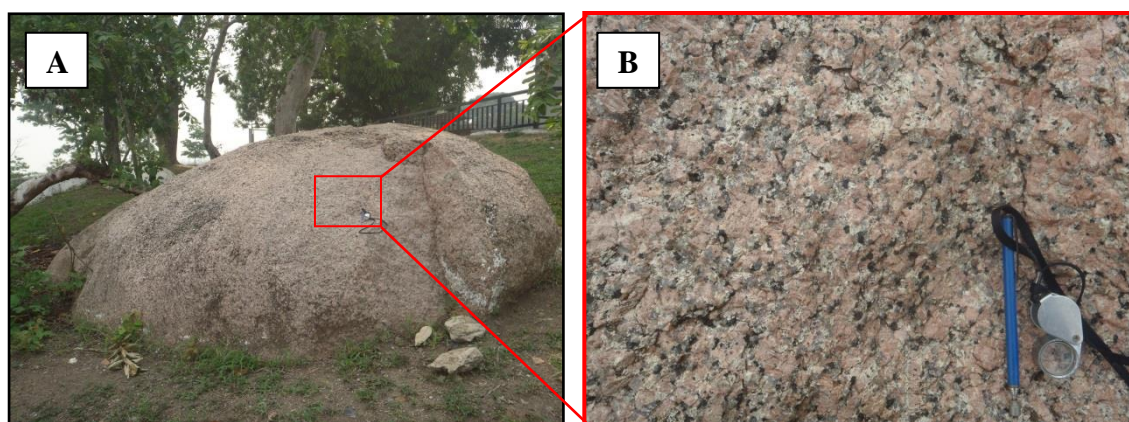
A composição da água subterrânea do domínio poroso da área de estudo é típica de ambiente abastecido pela água pluvial devido a elevada presença de bicarbonato, além do pH ácido (média de 5,3) que, por sua vez, lixivia os sedimentos e rochas as quais disponibilizam para a água subterrânea elementos móveis de cálcio, sódio e potássio, e secundários como cloreto, sulfato, fluoreto e manganês, presentes em concentrações normais, exceto o ferro que está contido em alta concentração em alguns poços da área de estudo, em virtude de sua alta mobilidade em ambientes ácidos e redutores. O nitrato, ademais, pode estar presente naturalmente nas águas subterrâneas com teores entre 0,1 a 10,0 mg/L (FEITOSA et al., 2008). Não obstante, na área de estudo, o nitrato apresenta-se concentrações elevadas, com valor médio de 60,3 mg/L e máximo de 487,4 mg/L. Lima (2008), em sua pesquisa, constatou

valores elevados na porção sul da área de estudo relacionando-os à contaminação antrópica (esgoto e depósitos de lixo).

#### 6.4 MODELO CONCENTUAL HIDROGEOLÓGICO

O sistema aquífero da área de estudo é constituído pelo domínio hidrogeológico poroso que sobrepõe as rochas granitoides do embasamento regional, apresentando-se de modo heterogêneo, anisotrópico e de caráter semiconfinado a livre. Seu embasamento, caso tenha uma produtividade mínima, poderá configurar o domínio hidrogeológico fissural, implicando em um sistema aquífero misto. A evidência de rochas do embasamento em superfície é representada por matacões de granitoides que ocorrem próximos da porção sudoeste da área de estudo (**Figura 65**), além de ser identificada em perfis estratigráficos por saprólito ou embasamento em subsuperfície (**Apêndice A, C, E e F**).

**Figura 65** - Matacão (A) e detalhe de granitoide (B). Localização: próximo à igreja Santo Antônio, margem direita do rio Madeira. (Ponto – 3, 10/09/2016).



O domínio hidrogeológico poroso (**Figura 66**) é formado pela cobertura cenozoica que contempla materiais lateríticos (subdomínio hidrogeológico laterítico), bem como sedimentos indiferenciados e aluvionares (subdomínio hidrogeológico sedimentar). O subdomínio hidrogeológico sedimentar, por sua vez, foi dividido em zonas designadas aquíferos, sedimentos indiferenciados e aluvionar, com base na produtividade dos poços (Diniz et al., 2012), estratigrafia e pela topografia.

O fluxo principal que a água subterrânea percorre é radial e ocorre do centro, onde as cotas topográficas são mais elevadas, para as bordas da área de estudo em direção aos rios

Madeira e Candeias. Na porção oeste, a direção do fluxo subterrâneo concorda com a do fluxo superficial dos igarapés Grande, Tanques e Belmont em direção ao rio Madeira. Da mesma forma, o fluxo subterrâneo da porção leste concorda com o fluxo do igarapé Tancredo Neves em direção ao rio Candeias.

Com relação aos locais de recargas, os mesmos foram definidos a partir das linhas de fluxo subterrâneo divergentes e localizam-se na porção central, no subdomínio hidrogeológico laterítico, onde os níveis potenciométricos e as cotas são relativamente elevadas. Entretanto, porções do terreno com cotas intermediárias do subdomínio sedimentar podem representar locais de recargas por serem constituídos de material permeável. Esses locais são responsáveis pelo abastecimento dos aquíferos livres e semiconfinados do domínio poroso e sua possível fonte de recarga direta pode estar relacionada às águas pluviais em razão das elevadas concentrações de bicarbonato em relação aos outros íons em sua composição. Porções desse domínio hidrogeológico poroso que apresentam declividades mais acentuadas e próximas às drenagens são desfavoráveis à recarga do aquífero e possivelmente indicam locais de descargas.

A recarga direta do aquífero poroso mostra valor aproximado de 234,7 mm/ano, o que equivale a 10% da precipitação pluviométrica (2.347,7 mm/ano). Os 90% restantes podem corresponder à evapotranspiração e ao escoamento superficial destinados aos igarapés e rios, principalmente nas áreas mais impermeabilizadas. Centros urbanos podem apresentar um aumento da recarga direta por meio de vazamentos da rede de água e esgoto doméstico e industrial, bem como de fossas sépticas e tubulações de captação da água pluvial (LERNER, 1990). São consideradas contribuições antrópicas por representarem recargas de águas não naturais que podem comprometer, além da qualidade, a quantidade de água subterrânea. O mesmo autor afirma, ainda, que os vazamentos de tubulações de captação de água da chuva são possíveis fontes de contaminação visto que a água pluvial lava a superfície (ruas e calçadas) e carrega poluentes como óleo, combustível, graxas e sabão. Os vazamentos por esgotos domésticos e industriais contêm excesso de contaminantes que podem causar doenças como diarreias e disenterias (cólera e a giardíase), febre tifoide e paratifoide, leptospirose, amebíase, hepatite infecciosa e ascaridíase (BRASIL, 2006).

Os locais de descargas são localmente representados pela convergência do fluxo subterrâneo em direção aos igarapés Belmont, Grande, Tancredo Neves, Tanques, onde os níveis potenciométricos são baixos e o nível estático mais raso. Os locais de descarga são evidenciados por feições interdigitadas da superfície potenciométrica e por linhas de fluxo subterrâneo convergentes no entorno da drenagem, como podem ser observadas no igarapé

Belmont, porção norte da área de estudo (**Figura 66**). No entanto, os fluxos subterrâneos mais profundos, próximos ao embasamento regional, possivelmente, não seguem a mesma direção dos fluxos subterrâneos menos profundos por causa da diferença de condutividade hidráulica entre as camadas (FETTER, 2001). Diante disso, apesar do sentido de fluxo subterrâneo da porção leste ser em direção ao rio Candeias, o fluxo regional mais profundo das águas subterrâneas provavelmente se direciona ao rio Madeira por tratar-se do nível de base regional.

As águas subterrâneas da área de estudo são bicarbonatadas sódicas (37,8%), sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas (37,8%) e bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (25%), conforme o Diagrama de Piper e têm pH predominantemente ácido (valor médio de 5,5). Cerca de 14,4% dos poços estudados apresentaram águas com concentrações de ferro superiores a 0,3 mg/L, sendo imprópria para o consumo humano (BRASIL, 2008). Essa concentração elevada desse íon pode estar sendo causada pela lixiviação de lateritas e/ou minerais ricos em ferro de rochas do embasamento, ou pode ser consequência da contaminação antrópica, incluindo a interação da água subterrânea com tubulações de ferro ou da própria estrutura (filtros) dos poços. Cerca de 15% dos poços com cota média inferior a 82,7 metros possui concentração média de nitrato de 60,3 mg/L e máxima de 487,4 mg/L, apresentando restrições para o consumo humano visto que a água subterrânea exibe concentrações naturais de 0,1 a 10 mg/L (FEITOSA et al., 2008). Lima (2008) constatou, da mesma forma, elevados valores de nitrato na porção sul da área de estudo relacionando-os à contaminação por atividades antrópicas (esgoto, depósitos de lixo, por exemplo).





#### 6.4.1 Subdomínio hidrogeológico laterítico

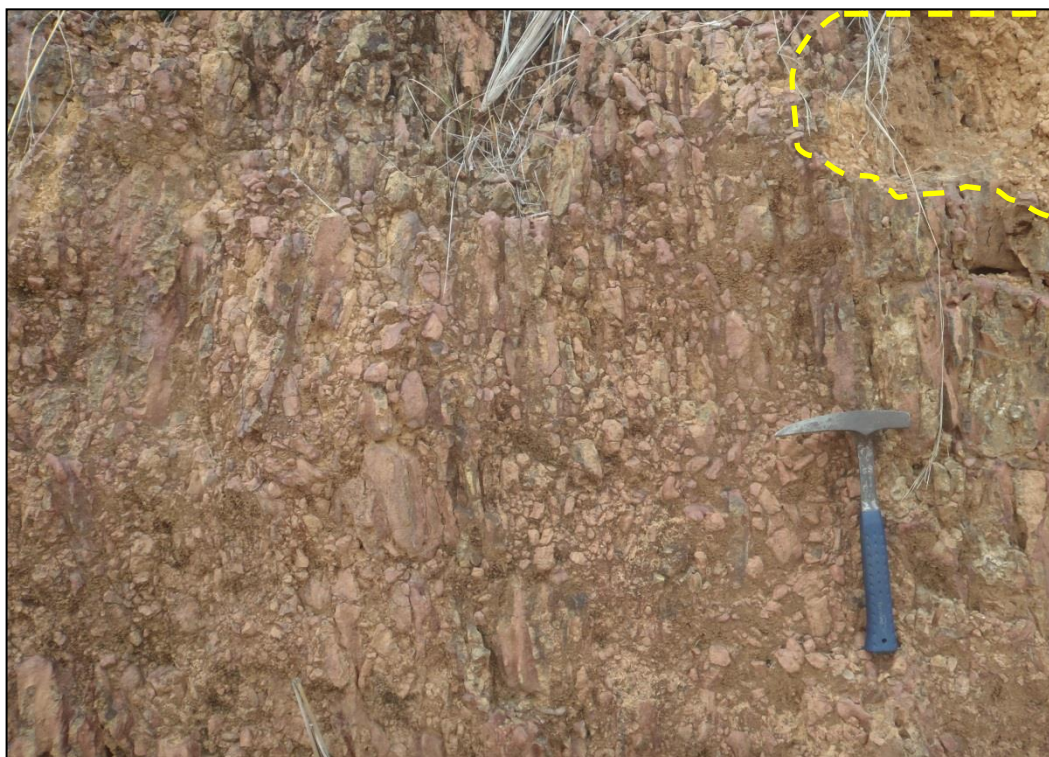
O subdomínio hidrogeológico laterítico abrange o perfil laterítico imaturo formado pelo horizonte argiloso (na base) e horizonte ferruginoso ou zona coesa/incoesa (no topo). Neste subdomínio são identificados aquíferos pobres, livres podendo ter porções semiconfinadas.

A partir da cota de 87 metros, o relevo se destaca com corpos alongados que compõem colinas espraçadas ou suaves platôs na direção NW/SE, preferencialmente, e NE/SW, subordinados, que são delimitados por declividades altas. Esses arranjos morfológicos estão relacionados à resistência de processos intempéricos subatuais onde é exposto o horizonte ferruginoso (zona coesa), descrito por Nascimento et al. (2012). A zona coesa é encontrada em cotas superiores a 60 metros, com espessura média de 5 metros (mínima de 3,7 e máxima de 9,3 metros), conforme as seções 1, 3 e 4 (**Apêndice A, C e D**). É formado por nódulos e pisólitos milimétricos a centimétricos, em estruturas colunares cimentadas fortemente (**Figura 67**) ou fracamente (**Figura 68**), por material argiloso, como mencionado por Nascimento et al. (2012).

**Figura 67** - Detalhe (linha amarela pontilhada) para a laterita coesa, bem cimentada *in situ*. Na porção superior da laterita coesa encontra-se a construção da Universidade Federal de Rondônia - Centro, e na porção inferior, piso de cimento-calçada. Localização: UNIR - Centro. (Ponto – 1, cota 79 metros, 10/09/2016)



**Figura 68** - Laterita coesa bem alterada, com preservação de estruturas colunares em um corte de estrada na Estrada Santo Antônio. O detalhe (linha amarela pontilhada) mostra a facilidade de desagregação (Ponto 4, cota 90 metros, 10/09/2016). Localização: Estrada Santo Antônio.



O horizonte ferruginoso - zona coesa - pode estar sobreposta pelo produto do seu próprio dismantelamento *in situ* - zona incoesa - como mostra **Figura 69**. Para Nascimento et al. (2012), as lateritas incoesas são constituídas predominantemente por grãos nas frações seixo, grânulo e areia (87%), bem como de argila de modo subordinado, além de traços de silte. Por conter uma grande quantidade de materiais grossos envoltos por finos, possuem, provavelmente, uma permeabilidade moderada. No entanto, as lateritas incoesas estão distribuídas, também, em cotas menos elevadas, representadas por depósitos coluvionares ou aluvionares pertencentes ao subdomínio sedimentar.



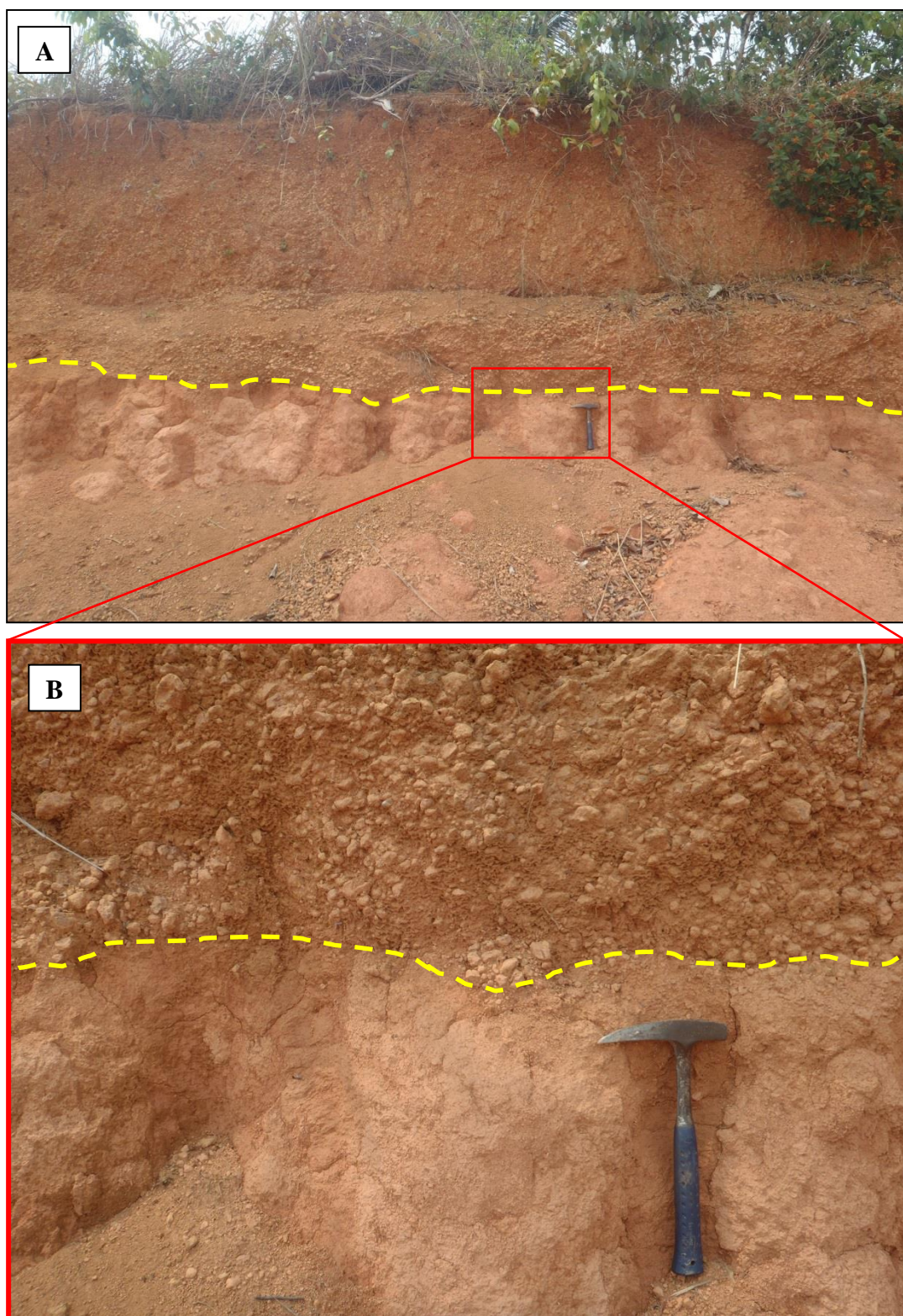
**Figura 69** - Matação de laterita coesa bem alterada e cobertura gerada pela sua decomposição, composta por materiais finos com presença de grânulos, seixos e blocos (Ponto 13, cota 74 metros, 10/09/2016). Localização: Av. Calama.



O horizonte argiloso é de difícil mapeamento em superfície, pois se encontra coberto por lateritas coesas e incoesas, próximo à cota 94 metros (**Figura 70**), sedimentos aluvionares e solos indiscriminados. Em cotas próximas a 83 metros, o horizonte argiloso mosqueado aflora (**Figura 71**). Em subsuperfície, sua espessura varia de 20 a 55 metros (média de 40 metros) e sua base faz contato irregular com o saprólito, produto da decomposição do embasamento granítico regional, em cotas topográficas que variam de 7 a 52 metros (média de 29,8 metros), como pode ser observado nas seções estratigráficas 1, 2, 4 e 7 (**Apêndice A, B, D e G**).



**Figura 70** - Visão geral do afloramento (A) e detalhe (linha amarela pontilhada) do contato do horizonte mosqueado (abaixo) com a laterita incoesa (B). (Ponto 7, cota 94 metros, 10/09/2016). Localização: próximo à Faro.





**Figura 71** - Horizonte mosqueado, delimitado entre as linhas pontilhadas amarelas (Ponto 15, cota 83,5 metros, 17/09/2016). Localização: próximo à Av. Jatuarana.



O horizonte argiloso é composto basicamente por argila com areia (fina), o qual pode ser dividido em duas zonas que se diferenciam pela coloração (branca, cinza, vermelha levemente roxa) e pela proporção de areia e argila, denominadas zona argilosa vermelha e mosqueada (NASCIMENTO et al., 2012). Para os autores, a zona argilosa vermelha pode conter argila (60%), areia e grânulo com teores próximos a 40%. No que tange à zona mosqueada, esta pode conter 74,5% de argila e 24,6% de areia e grânulo, além de apresentar manchas ferruginosas vermelhas centimétricas e irregulares (hematita e goethita), dispersas em uma matriz argilosa esbranquiçada a amarelada (caulinita). Devido a esta granulação, a sua condutividade hidráulica pode variar de  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  cm/s, onde as porções menos permeáveis indicam os aquitardos e as mais permeáveis os aquíferos pobres. Estes aquíferos do subdomínio hidrogeológico laterítico possuem caráter livre, mas quando sobrepostos por lateritas coesas podem apresentar o caráter semiconfinado.

Os aquíferos do subdomínio hidrogeológico laterítico exibem um rebaixamento médio de 15,2 metros (mínima de 8 e máxima de 30 metros) e uma produtividade muito baixa a baixa, com vazões específicas de 0,03 a x 0,5 m<sup>3</sup>/h/m (média de 0,26 m<sup>3</sup>/h/m), consequentemente, são indicados para captação de água para consumo local. As maiores

vazões específicas podem estar relacionadas com o maior teor de areia da zona argilosa vermelha. O nível estático tem média de 13 metros (mínima de 6 e máxima de 21 metros), potenciometria média de 81,2 metros (mínima de 73,1 e máxima de 84,9 metros) e acompanha a topografia do terreno como visto nas seções 2, 3 e 7 (**Apêndice B, C e G**).

Apesar de ser constituído por materiais pouco permeáveis, o subdomínio hidrogeológico laterítico se apresenta como local de recarga para o aquífero, pois nele o nível potenciométrico é elevado ( $> 80$  metros). Os locais de recarga neste subdomínio são indicados por setas divergentes no mapa de fluxo (**Figura 52, p.89**), sobretudo nas porções mais planas do terreno.

#### **6.4.2 Subdomínio hidrogeológico sedimentar**

Na área de estudo, o subdomínio hidrogeológico sedimentar é predominante em superfície e engloba as unidades estratigráficas referentes cobertura sedimentar indiferenciada e depósitos aluvionares (SCANDOLARA et al., 1999). Situa-se em cotas inferiores a 89 metros, onde o relevo é plano a levemente ondulado, porém, próximo às drenagens sua declividade é mais acentuada podendo receber contribuição de recarga de outros subdomínios adjacentes. Este subdomínio hidrogeológico é heterogêneo e anisotrópico porque é formado por camadas arenosas, descontínuas e de variadas granulações (fina, média e grossa) envoltas por frações menores (argila/silte), o que implica em distintos comportamentos hidráulicos.

Os depósitos aluvionares são identificados em perfil topográfico (**Apêndice D e E**), por camadas descontínuas ou lentes métricas (espessura média de 13,5 metros), formados por areia fina a grossa com porções de conglomerados. São camadas envoltas por materiais de granulação mais fina, como argila, silte, argila com areia, atribuindo o caráter semiconfinado ao aquífero, e por vezes livre. De acordo com Suguio (2003), as frações mais grossas podem corresponder a um ambiente de alta energia relacionado ao preenchimento de canais ativos de leitos de rios e as frações finas podem indicar a sedimentação em planícies de inundação ou canal abandonado, apontando um ambiente de baixa energia. Esses depósitos podem estar concatenados à sedimentação em canais fluviais e planícies de inundação pretéritos e atuais, do leito do rio Madeira (oeste da área de estudo) e seus afluentes, como os igarapés Belmont e Tanques (norte), rio das Graças e igarapé Tancredo Neves (leste), bem como os igarapés Bate-Estacas (sul) e Grande (oeste). A evidência dos depósitos aluvionares está ligada à presença de estruturas sedimentares (estratificação cruzada) em camadas arenosas, típicas de

ambiente fluvial (**Figura 72**), encontrada a 2,7 km a leste da área de estudo, em cava de areia na estrada dos Piriquitos.

**Figura 72** - Estrutura sedimentar de ambiente fluvial (estratificação cruzada) em um depósito arenoso (Ponto 16, 17/09/2016). Localização: estrada dos Piriquitos, cava de areia Piauí.

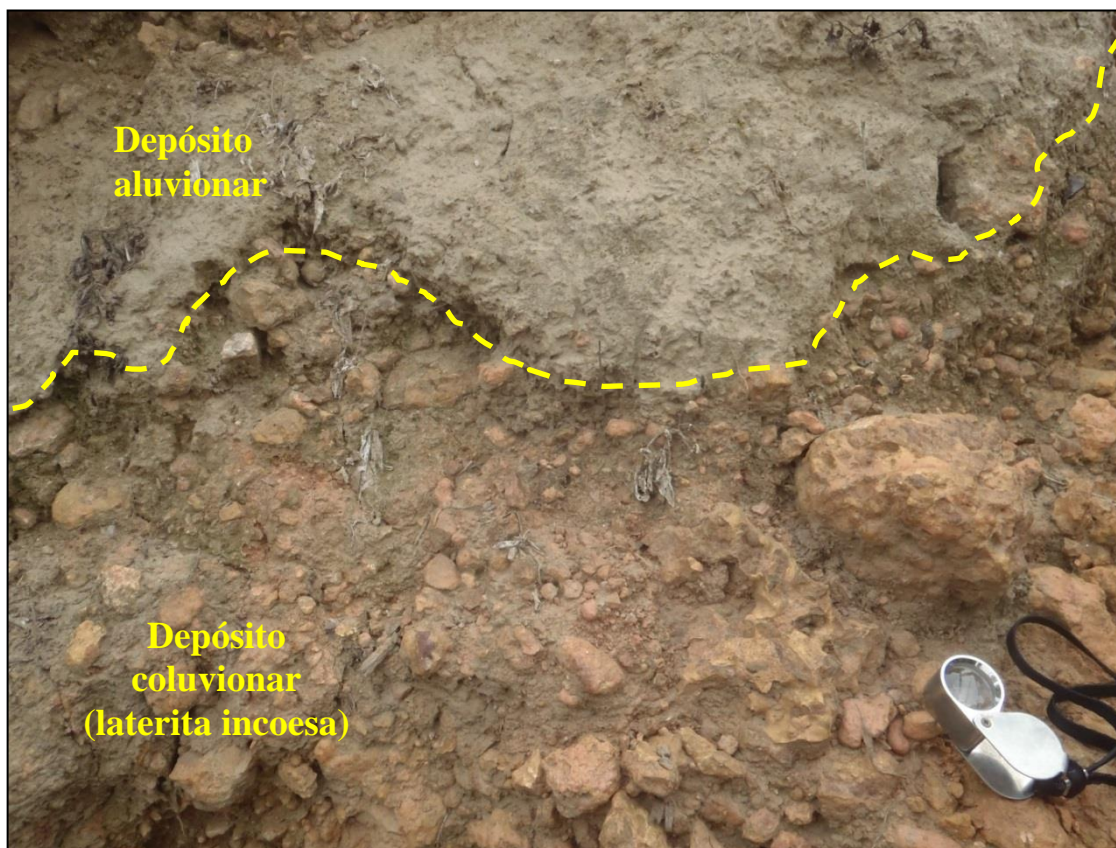


O subdomínio hidrogeológico sedimentar, consoante o memorial descritivo dos poços, está sobreposto às rochas do embasamento regional na cota topográfica média de 18,03 metros (mínima de 10 e máxima 30 metros) a uma profundidade média de 65,7 metros (mínima de 54 e máxima de 74 metros). Em cotas próximas de 57 metros, no entorno de Igarapés, os depósitos aluvionares sobrepõem os coluvionares (**Figura 73**). Os depósitos aluvionares sobrepõem os materiais argilosos da zona mosqueada do subdomínio hidrogeológico laterítico, nas proximidades da cota topográfica de 70 metros e/ou profundidade de 15 metros (**Figura 74**).

Os depósitos de colúvios correspondem aos materiais de diferentes granulações e composição, desde argila até cascalho. São provenientes do transporte gravitacional de lateritas incoesas, materiais do horizonte argiloso mosqueado, sedimentos aluvionares pretéritos ou materiais argilosos indiscriminados para porções mais rebaixadas do terreno.



**Figura 73** - Contato (linha amarela pontilhada) entre o depósito aluvionar do rio Madeira (acima) com o depósito de colúvio formado por lateritas incoesas (abaixo). (Ponto 2, cota 56,6 metros, 10/09/2016).  
Localização: próximo à estação ferroviária Madeira-Mamoré.



A condutividade hidráulica calculada com os dados de testes de bombeamento para os poços deste subdomínio hidrogeológico variou de  $2,5 \times 10^{-4}$  a  $6,8 \times 10^{-2}$  cm/s, com uma média de  $2 \times 10^{-2}$  cm/s. A transmissividade teve média de  $1,8 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s e valores mínimo e máximo de  $6,9 \times 10^{-5}$  a  $5,6 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, comprovando a existência de aquíferos pobres a excelentes. São valores de condutividade hidráulica e transmissividade que estão em conformidade com os valores obtidos na área de estudo por Campos (1998) e Morais (1998).

Desta forma, este subdomínio hidrogeológico possibilitou a divisão em zonas, designadas: aquífero, sedimentos indiferenciados e aluvionar. Teve como base a classificação de produtividade de Diniz et al. (2012), (**Figura 24, p. 46**) e o intervalo de condutividade hidráulica correspondente às granulações estabelecido por Custodio e Llamas (1976), (**Figura 25, p. 48**).



**Figura 74** - Contato entre o depósito aluvionar com o horizonte mosqueado (A). Bloco de areia coesa, mal selecionada, levemente ferruginizado (B). (Ponto 14, cota 71 metros, 17/09/2016).



#### a) Zona aquífero

A zona aquífero, localizada nas proximidades de drenagens nas porções noroeste e sudeste da área de estudo, constitui-se predominantemente de argila ou argila com areia, além de camadas delgadas de areia média a grossa e, por vezes, laterizadas. Considerando a sua baixa permeabilidade, produz vazões específicas de 0,06 a 0,39 m<sup>3</sup>/h/m (média de 0,18 m<sup>3</sup>/h/m) e rebaixamento médio de 32,3 metros (mínimo de 19 e máximo 43 metros). São vazões específicas indicadas para o abastecimento restrito (DINIZ et al., 2012) e implicam em uma produtividade baixa a muito baixa.

O nível estático varia de 3,4 a 21 metros (média de 10,7 metros) posto que seu nível potenciométrico encontra-se abaixo de 80 metros. Os aquíferos estão presentes em menor proporção nas zonas sedimentos indiferenciados e aluvionar que perfazem camadas com espessura média de 12,7 metros, intercalados com aquíferos, conforme pode ser observado nas seções 3, 4 e 7 (**Apêndice C, D e G**). Diante disso, os aquíferos podem atribuir o caráter semiconfinado para os aquíferos e diminuição da produtividade do poço do subdomínio hidrogeológico sedimentar.

#### b) Zona sedimentos indiferenciados

A zona sedimentos indiferenciados é constituída por materiais de permeabilidade predominantemente moderada, formada por depósitos de areia, silte, argila e lateritas incoesas intercaladas. Sua condutividade hidráulica varia de 10<sup>-5</sup> e 10<sup>-3</sup> cm/s, indicando aquíferos pobres. No entanto, por se tratar de uma zona heterogênea, podem ocorrer localmente porções do aquífero de maior ou menor permeabilidade, implicando no aumento ou diminuição da condutividade hidráulica e vazão específica. Esta zona é predominante na área de estudo, em superfície e subsuperfície, observada nas seções 4, 5 e 6 (**Apêndice D, E e F**). Abrange cotas intermediárias (menores que 82,5 metros) com nível estático variando de 2,8 a 35 metros (média de 12,1 metros), além de um rebaixamento médio de 18,4 metros (mínimo de 0,8 e máximo de 67,8 metros). O seu nível potenciométrico possui média de 77,6 metros com mínima de 55,6 e máximo de 88,5 metros. As vazões específicas variam de 0,02 a 7,5 m<sup>3</sup>/h/m (média de 1,9 m<sup>3</sup>/h/m), indicando uma produtividade muito baixa a moderada. Os poços com vazão específica maior que 1 m<sup>3</sup>/h/m são indicados para abastecimento local de pequenas comunidades (DINIZ et al., 2012). A zona sedimentos indiferenciados exibe caráter livre a semiconfinado e sobrepõe a zona mosqueada do subdomínio laterítico.

### c) Zona aluvionar

A zona aluvionar apresenta-se de modo heterogêneo e anisotrópico, formada por camadas arenosas com grãos mal selecionados (média de 15 metros), interdigitadas por sedimentos argilosos, conforme pode ser observado no perfil topográfico 7 (**Apêndice G**).

Com rebaixamento médio de 6,2 metros (mínimo de 1 e máximo de 20,5 metros) e vazões específicas de 0,6 a 28 m<sup>3</sup>/h/m (média de 11,4 m<sup>3</sup>/h/m), a zona aluvionar é composta por sedimentos com características hidrogeológicas de aquíardos até aquíferos excelentes e de caráter livre a semiconfinado. Devido a significativa espessura de material arenoso, estas camadas configuram o aquífero de alta produtividade. Os poços com vazões específicas superiores a 2 m<sup>3</sup>/h/m representam aquíferos bons com produtividade alta e são indicados para o abastecimento de pequenas comunidades (DINIZ et al., 2012). No entanto, os poços com vazões específicas superiores a 4 m<sup>3</sup>/h/m indicam uma produtividade muito alta, ou seja, são aquíferos excelentes que podem ser utilizados para o abastecimento de cidades e a irrigação (DINIZ et al., 2012). Conforme os autores, esse tipo de aquífero se destaca em âmbito nacional por apresentar vazões específicas acima da média nacional.

A zona aluvionar está localizada em cotas inferiores a 82,5 metros, porção leste da área de estudo, onde engloba as sub-bacias Tancredo Neves, Garças e parte da sub-bacia Belmont. Esta zona pode ser abastecida diretamente pela precipitação pluviométrica ou, indiretamente, pelo fluxo subterrâneo de níveis potenciométricos mais elevados, como indicado pelas linhas de fluxo subterrâneo (**Figura 52, p. 89**). O nível estático varia de 2 a 16 metros (média de 9,3 metros), visto que o nível potenciométrico possui média de 80 metros (mínima de 75,8 e máxima de 85,4 metros).

Insta observar que os 23 poços estudados da zona aluvionar interceptam as rochas do embasamento regional, apresentam de 3 a 44 metros de espessura total de areia (média de 19,1 metros), ou seja, são poços constituídos em média por 24% de sedimentos na fração areia.



## CONCLUSÕES

O sistema aquífero poroso inserido em partes do perímetro urbano e área de expansão da cidade de Porto Velho é uma fonte alternativa para o abastecimento da cidade, com restrições de exploração, por se tratar de um aquífero heterogêneo e anisotrópico. Em função de sua produtividade variada, com predomínio da moderada (zona sedimentos indiferenciados - subdomínio sedimentar), é um aquífero indicado para o abastecimento local ou residencial, exceto a zona leste (zona aluvionar - subdomínio sedimentar) que possui produtividade que varia de alta a muito alta, dependendo do local, sendo assim indicada para abastecimento de condomínios residenciais, pequenas comunidades, zona de indústria ou até para uma cidade. No entanto, há porções (zona aquífero - subdomínio sedimentar e subdomínio laterítico) nas quais sua produtividade é muito baixa a baixa, indicada à exploração local e restrita a sazonalidade.

Por tratar-se de um aquífero semiconfinado a livre, a área de estudo é considerada favorável para recarga do aquífero, apesar de conter partes constituídas por materiais de permeabilidade moderada a baixa. Contudo, as porções mais elevadas e planas indicam os principais locais de recarga evidenciadas pelo elevado nível potenciométrico e pelas linhas de fluxo subterrâneo divergente.

Com o gradativo aumento das áreas impermeáveis, representadas por calçadas cimentadas e vias públicas asfaltadas (zona aluvionar - subdomínio hidrogeológico sedimentar), em coexistência com materiais de permeabilidade moderada a baixa (subdomínio hidrogeológico laterítico), é evidenciada a necessidade de contribuições antrópicas como construções de parques, calçadas verdes (grama ou brita) e plantação de árvores. Estes são exemplos de benfeitorias que contribuem com a recarga do aquífero e com a redução do escoamento horizontal das águas pluviais que, por vezes, acumulam na superfície que causam enchentes semelhantes à ocorrida em 2013.

As águas subterrâneas do aquífero poroso apresentam elevados valores de bicarbonato em relação aos outros íons e pH médio de 5,5, que indicam que é abastecido pela água pluvial. Contêm elevadas concentrações de ferro e nitrato, provenientes de possíveis contaminações naturais e/ou antrópica.

Diante deste panorama, a população busca alternativas para a obtenção de água para seu consumo por meio da captação de água subterrânea em poços tubulares e rasos (amazônicos). Os poços amazônicos são construídos manualmente com carência de critérios

técnicos tornando-se alvo de contaminação antrópica, além de gerarem problemas de segurança em seu manuseio.

A captação de esgoto mostra-se atualmente em uma situação mais crítica em relação ao abastecimento público água, visto que apenas 2,07% da cidade possui captação de esgoto. Principalmente na porção leste da área de estudo (subdomínio hidrogeológico sedimentar, zona aluvionar), onde a produtividade dos poços é mais elevada, admite-se a necessidade de implementar o sistema de captação de esgoto em conjunto com sua fiscalização e esclarecimento à população a respeito da conservação de áreas de recarga e as causas da contaminação da água subterrânea.

Por meio da compreensão da estrutura, dinâmica e propriedades hidráulicas do sistema aquífero poroso (modelo conceitual hidrogeológico) este estudo buscou auxiliar o desenvolvimento e o fortalecimento da gestão dos recursos hídricos subterrâneos a fim de contribuir para a conservação quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas com possibilidade de sua aplicação na elaboração do plano diretor da cidade de Porto Velho. Cabe ressaltar que a análise ora apresentada pode permitir ao poder público a melhoria na sustentabilidade do sistema aquífero, além de incentivar o aproveitamento racional da água subterrânea pela população que padece com o escasso quadro de abastecimento público de água.

## REFERÊNCIAS

ADAMY, A.; ROMANINI, S. J. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. geologia da região Porto Velho-Abunã; Porto Velho (SC.20-V-B-V), Mutum-Paraná (SC.20-V-C-VI), Jaci-Paraná (SC.20-V-D-I), Abunã (SC.20-V-C-V), estados de Rondônia e Amazonas.** Porto Velho/RO, CPRM e DNPM, 273p., 1990.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **A navegação interior e sua interface com o setor dos recursos hídricos.** Brasília/DF, ANA, 49p., 2005.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Região hidrográfica amazônica.** Brasília/DF, 2011. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Água na medida certa: a hidrometria no Brasil.** Brasília/DF, ANA, 72p., 2012.

BETTENCOURT, J. S.; TOSDAL, R. M.; LEITE, J. R. W. B.; PAYOLLA, B. L. Mesoproterozoic rapakivi granites of the Rondônia Tin Province, southwestern border of the Amazonian Craton, Brazil-I. Reconnaissance U-Pb geochronology and regional implications. **Precambrian Research**, v.95, p.41-67, 1999.

BRASIL. Decreto-Lei nº 490, de 4 de março de 1969. Autoriza o Poder Executivo a criar Companhias de Águas e Esgotos para os Territórios do Amapá, Rondônia e Roraima e dá outras providências. Brasília/DF, **Diário Oficial da União**, 1969.

BRASIL. Decreto nº 86.029, de 27 de maio de 1981. Dispõe sobre a criação do Programa Integrado de Desenvolvimento do Noroeste do Brasil (POLONOROESTE). Brasília/DF, **Diário Oficial da União**, 1981.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **SNIS – Sistema nacional de informações sobre saneamento: série histórica de indicadores e informações de água e esgoto do estado de Rondônia do ano 2014.** Atualização permanente. Brasília/DF, 1996. Disponível em: <<http://app.cidades.gov.br/serieHistorica>>. Acesso em: 02 maio 2016.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília/DF, **Diário Oficial da União**, 1997.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 1469, de 29 de dezembro de 2000. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília/DF, **Diário Oficial da União**, 2000.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília/DF, **Diário Oficial da União**, 2004.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. SECRETARIA DE VIGILÂNCIA EM SAÚDE. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Série B. Textos Básicos de Saúde. Brasília/DF, Ministério da Saúde, 212p., 2006.

BRASIL. SECRETARIA DO PROGRAMA DE ACELERAÇÃO DO CRESCIMENTO. **PAC – Programa de Aceleração do Crescimento**. Atualização permanente. Brasília/DF, SEPAC/MPOG, 2007a. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. **Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília/DF, Ministério do Meio Ambiente, 38p., 2007b.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, CONAMA, Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília/DF, **Diário Oficial da União**, 2008.

CAERD – COMPANHIA DE ESGOTO E SANEAMENTO DO ESTADO DE RONDÔNIA. **Dados de teste de bombeamento dos poços tubulares da CAERD**. Porto Velho/RO, GEOPOÇOS, 2004.

CAMARGO, M. N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J. H. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas/SP, 12(1): 11-33, 1987.

CAMPOS, J. C. Avaliação preliminar do potencial hidrogeológico da cidade de Porto Velho (RO). In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10, São Paulo. **Anais**. São Paulo/SP, ABAS, 1998, p.43.

CAMPOS, J. C. V.; MORAIS, P. R. C. Morfologia dos aquíferos da área urbana de Porto Velho (RO). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13. **Anais**. Belo Horizonte/MG, 1999. CD-ROM.

CAMPOS, J. C. V.; FILHO, E. P. S.; OLIVEIRA, I. R. Contaminação do aquífero Jaci-Paraná na cidade de Porto Velho/RO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, **Anais**. Cuiabá/MT, ABAS, 2004.

CARVALHO JUNIOR, V. N. Deposição atmosférica e composição química da água de chuva. **Revista Tecnologia**, Fortaleza/CE, v.25, n.2, p.61-71, 2004.

COSTA, M.L. **Introdução ao intemperismo laterítico e à laterização**. In: LICHT, O. A. B.; MELLO, C. S. B.; SILVA, C. R. Prospecção geoquímica: depósitos minerais metálicos, não metálicos, óleo e gás. Rio de Janeiro/RJ, SBGq, CPRM. p.199-244, 2007.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **SIAGAS – Sistema de informações de águas subterrâneas**. Atualização permanente. Brasília/DF, CPRM, 1997. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 14 out. 2014.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Avaliação da qualidade da água subterrânea no município de Porto Velho/RO – Brasil**. Porto Velho/RO, CPRM, 2015.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. 1.ed. Barcelona, Omega S.A, 1157p., 1976.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; FEITOSA, F. A. C.; FREITAS, M. A.; PEIXINHO, F.C. Metodologia para elaboração de mapas hidrogeológicos. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, **Anais**. Bonito/MS, 2012, p.1-4.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro/RJ. Reunião Técnica de Levantamento de Solos, 10, **Súmula**. Rio de Janeiro, 1979, 83p.

EULER, A.; MILLIKAN, B.; BRITO, E. B.; CARDOZO, I. B.; LEROY, J. P.; CAMINHA, L.; HARGREAVES, M. I.; MOTTA, R. V.; CUNHA, S.; MATIAS, S.; ALVES, V.; GLASS, V. **O Fim da Floresta? A devastação das Unidades de Conservação e Terras Indígenas no Estado de Rondônia**. RONDÔNIA, GTA Rondônia, 62p., 2008.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3.ed., Rio de Janeiro/RJ, CPRM, 812p., 2008.

FERNANDES, L. C. (Org.). **Sub-bacias hidrográficas do estado de Rondônia**. Porto Velho/RO, Governo de Rondônia, 140p., 2000.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4.ed., New Jersey, Prentice Hall, 598p., 2001.

FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e técnicas atuais**. São Paulo/SP, Oficina do Texto, 318p., 2008.

FORNARO, A. Águas de chuva: conceitos e breve histórico. Há chuva ácida no Brasil? **Revista Revistausp**, São Paulo/SP, n.70, p.78-87, 2006.

FORTES, L. T. G.; RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R. (Orgs.). **Normais climatológicas do Brasil 1961–1990**. Ed. rev. ampl. Brasília/DF, INMET, 465p., 2009.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 604p., 1979.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Qualigraf**. Fortaleza/CE, FUNCEME, 2014. Disponível em: <<http://www3.funceme.br/qualigraf>>. Acesso em: 12 nov. 2014.

GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo/SP, Signus Editora, 502p., 2006.

GUERRA, A. T. Formação de lateritos sob a floresta equatorial amazônica (Território Federal do Guaporé). **Revista Brasileira de Geografia**. Rio de Janeiro/RJ, n.15, p.183-302, 1953.

GUIMARÃES, S. C. P.; SILVA, H. R. O. Monitoramento da área urbana de Porto Velho-ro ao longo de 27 anos, utilizando imagens de satélite. **Revista Terra Plural**. DOI: 10.5212/ v.9, n. Especial, p.140–156, 2015.

HANTUSH, M. S. **Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers**. Washington: Transactions of American Geophysical Union, v.37, n.6, p.702-714, 1956.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, DOI: 10.1007/s10040-001-0178-0, v.10, p.91-109, 2002.

HISCOCK, K. M. **Hydrogeology, principles and practice**. Oxford, Blackwell Science Ltd., 398p., 2005.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Resolução nº 1 de 25 de fevereiro de 2005. **Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro**. Rio de Janeiro/RJ, IBGE, 2005.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro/RJ, IBGE, 215p., 2010.

ISOTTA, C.A.L.; CARNEIRO, J. M.; KATO, H. T.; BARROS, R. J. L. **Projeto província estanífera de Rondônia**. Porto Velho/RO, CPRM e DNPM, 16v, 1978.

JOHNSON, A. I. U. S. Geological Survey. **Specific yield compilation of specific yields for various materials (1662-D)**. Retrieved from United States Government Printing, 1967. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/wsp/1662d/report.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2016.

KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. **Analysis and evaluation of pumping test data**. 2.ed., Wageningen, Netherlands: International Institute of Land Reclamation and Improvement, 377p., 1991.

LEAL, J. W. L.; SILVA, G. H.; ABREU, A. S.; LIMA, M. I. C. Granito Serra da Providência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. **Anais**. Ouro Preto/MG, SBG, 1976, v.4, p.59-74.

LEMONS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta no campo**. 3.ed., Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 83p., 1996.

LERNER, D. N. **Groundwater recharge in urban areas**. Atmospheric Environment. Parte B, DOI: 10.1016/0957-1272(90)90006-G, v.24, p.29-33, 1990.

LICHT, O. A. B. **Prospecção Geoquímica - princípios, técnicas e métodos**. 1.ed., Rio de Janeiro/RJ, CPRM, v.1, 216p., 1998.

LIMA, M. L. A. **Águas subterrâneas potencialmente impactadas por nitrato (NO<sub>3</sub>) na área urbana da cidade de Porto Velho: um estudo da geografia da saúde**. 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho/RO, 2008.

MAIA, R. G. N.; GODOY, H. K.; YAMAGUTI, H. S.; MOURA, P. A.; COSTA, F. S. F.; HOLANDA, M. A.; COSTA, A. C. **Projeto carvão no Alto Solimões**. CPRM, 1977.

MEINZER, O. E. **The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles**. Washington, United States Geology Survey, 321p., 1923.

MELO, D. P.; COSTA, R. C. R.; NATALI FILHO, T. Geomorfologia da Folha SC.20 (Porto Velho). In: **Projeto RADAMBRASIL**. Levantamento dos Recursos Naturais. Rio de Janeiro/RJ, DNPM, p.187-254, 1978.

MELO JUNIOR, H. R.; COSTI, A. C. Z. Avaliação da contaminação das águas subterrâneas por hidrocarbonetos provenientes de posto de abastecimento de combustível na Vila Tupi, Porto Velho/RO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, **Anais**. Cuiabá, ABAS, 2004.

MORAIS, P. R. C. **Mapa hidrogeológico do Estado de Rondônia**. Texto explicativo, escala 1:1.000.000, Programa Recursos Hídricos, CPRM/ Porto Velho/RO, 32p., 1998.

NASCIMENTO, T. C. N. **A natureza dos materiais lateríticos entre Porto Velho e Morrinhos: relação morfológica e aplicação**. 2012.79 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho/RO, 2012.

NASCIMENTO, T. C. N.; MANIESI, V.; ADAMY, A.; SANTOS, A. N. A Natureza e aplicação dos materiais lateríticos na área urbana e entorno de Porto Velho/RO. **Revista Geonorte**, Edição Especial, ISSN: 2237-1419, v.2, n.4, p.11-19, 2012.

OLIVEIRA, C. E. S. **Projeto materiais de construção civil da Folha de Porto Velho**. Informe de recursos minerais. Porto Velho/RO, CPRM, 558p., 2013.

PAYOLLA, B. L. **As rochas graníticas e sieníticas das cachoeiras Teotônio e Santo Antônio, rio Madeira, Porto Velho, Rondônia: geologia, petrografia e geoquímica**. 1994. 145 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1994.

PIPER, A. M. **A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses**. Transactions - American Geophysical Union. p.914-923, 1944.

QUADROS, M. L. E. S.; RIZZOTTO, G. J. (Orgs.). **Geologia e recursos minerais do estado de Rondônia: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do estado de Rondônia, escala 1:1.000.000**. Porto Velho/RO, CPRM, 116p., 2007.

QUADROS, M. L. E. S.; RIZZOTTO, G.J.; CRUZ, N.M.C.; OLIVEIRA, J.G.F; CASTRO, J.M.R. Depósitos fluviais da Formação Rio Madeira, pleistoceno superior da bacia do Abunã, Rondônia. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9, **Anais**. Belém/PA, SBG-Núcleo Norte, 2006. 1 CD-ROM.

RIZZOTTO, G. J.; OLIVEIRA, J. G. F.; QUADROS, M. L. E. S.; CASTRO, J. M. R.; CORDEIRO, A. V.; ADAMY, A.; DANTAS, M. E.; MELO JUNIOR, H. R. **Levantamento de informações para subsidiar o estudo de viabilidade do aproveitamento hidrelétrico (AHE) do rio Madeira**. AHE Santo Antônio - Relatório Final. Porto Velho/RO, CPRM, 2005. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/15523>>. Acesso em: 8 maio 2015.

RIZZOTTO, G. J.; CRUZ, N. M. C.; OLIVEIRA, J. G. F.; QUADROS, M. E. S.; CASTRO, J. M. R. Paleoambiente e o registro fossilífero pleistocênico dos sedimentos da Formação Rio Madeira. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9, **Anais**. Belém/PA, SBG-Núcleo Norte, 2006. 1 CD-ROM.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora/MG, Ed. do Autor, 220p., 2000.

RODRIGUES, É. R. D.; SANTOS, J. P.; MARTINS, A. S.; BASTOS, W. R.; CARVALHO, D. P.; HOLANDA, I. B. B.; ALMEIDA, R.; NASCIMENTO, E. L. Avaliação espacial da qualidade de água subterrânea na área urbana de Porto Velho – Rondônia – Brasil. **Scientia Amazonia**, v.3, n.3, p.97-105, 2014.

RONDÔNIA. Decreto Estadual nº 3.782, de 14 de junho de 1988. Define a política de ordenamento ambiental para ocupação racional das terras rurais do Estado de Rondônia, segundo o Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico de Rondônia e dá outras providências. Porto Velho/RO, **Diário Oficial do Estado de Rondônia**, 1988.

RONDÔNIA. Lei nº 547, de 30 de dezembro de 1993. Dispõe sobre a criação do Sistema Estadual de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia - SEDAR e seus instrumentos, estabelece medidas de proteção e melhoria da qualidade de meio ambiente, define a Política Estadual de Desenvolvimento Ambiental, cria o Fundo Especial de Desenvolvimento Ambiental-FEDARO e o Fundo Especial de Reposição Florestal-FEREF. Porto Velho/RO, **Diário Oficial do Estado de Rondônia**, 1993.

RONDÔNIA. **Zoneamento socioeconômico-ecológico do Estado de Rondônia. Secretaria de Planejamento do Estado de Rondônia: texto explicativo e mapas de geomorfologia, vegetação e solos, escala 1:250.000**. Porto Velho/RO, 1999.

RONDÔNIA. Lei Complementar nº 255, de 25 de janeiro de 2002. Dispõe sobre a criação do Sistema Estadual de Desenvolvimento Ambiental de Rondônia-SEDAR e seus instrumentos, estabelece medidas de proteção e melhoria da qualidade de meio ambiente, define a Política Estadual de Desenvolvimento Ambiental, cria o Fundo Especial de Desenvolvimento Ambiental-FEDARO e o Fundo Especial de Reposição Florestal-FEREF. Porto Velho/RO, **Diário Oficial do Estado de Rondônia**, 2002.

RONDÔNIA. SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL. **Atlas Geoambiental de Rondônia**. Porto Velho, v.2, 2002.

RONDÔNIA. SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL. **Boletim climatológico de Rondônia - 2010**. Porto Velho/RO, 2012.

RONDÔNIA. SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL. **Dados de precipitação e temperatura de 2011, 2012, 2013 da rede estadual meteorológica de Rondônia**. Atualização permanente. Porto Velho/RO, 2015. Disponível em: <<http://www.sedam.ro.gov.br/index.php/component/content/article/107-meteorologia/237-cogeomonitoramento>>. Acesso em: 15 out. 2015.

SCANDOLARA, J. E. **Geologia e recursos minerais do estado de Rondônia: texto explicativo e mapa geológico do estado de Rondônia**. Brasília/DF, CPRM, 97p., 1999.



SEMPLA – SECRETARIA MUNICIPAL DE PLANEJAMENTO E GESTÃO. **Cartas planialtimétricas (dxf) em escala 1:1.000, *shapefiles* e imagem de satélite Worldview.** Porto Velho/RO, 2001.

SILVA, R. M. **Introdução ao geoprocessamento: conceitos, técnicas e aplicações.** Novo Hamburgo/RS, Feevale, 176p., 2007.

SILVA FILHO, E. P.; CAMPOS, A. J. C. V. **Diagnóstico da captação de água subterrânea em Porto Velho.** Porto Velho/RO, EDUFRO, ISSN 1517-5421, v.2, n.29, 2001

SIPAM – SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA. **Desenvolvimento de metodologia para alerta de cheias e inundações na área urbana de Porto Velho/RO.** Porto Velho/RO, SIPAM-CNPq, 2014.

SUGUIO, K. **Geologia sedimentar.** São Paulo/SP, Edgard Blucher Ltda, 400p., 2003.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Climatology.** New Jersey, Drexel Institute of Technology, v.8, n.1, 104p., 1955.

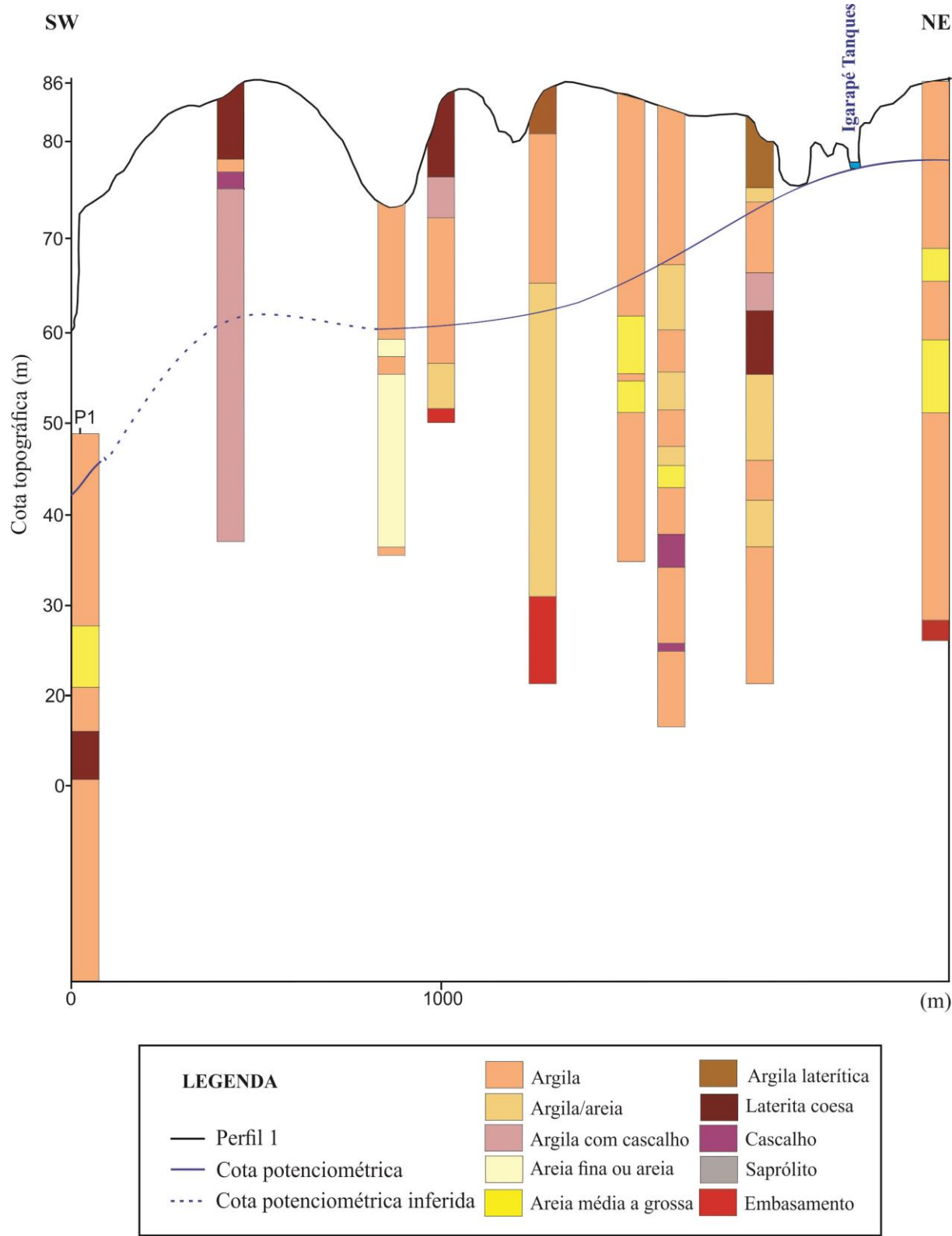
USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **The water cycle.** United States, 1879. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Acesso em: 09 abr. 2016.

VAITSMAN, D. S.; VAITSMAN, M. S. **Água mineral.** 1.ed., Rio de Janeiro/RJ, Interciência, 220p., 2005.

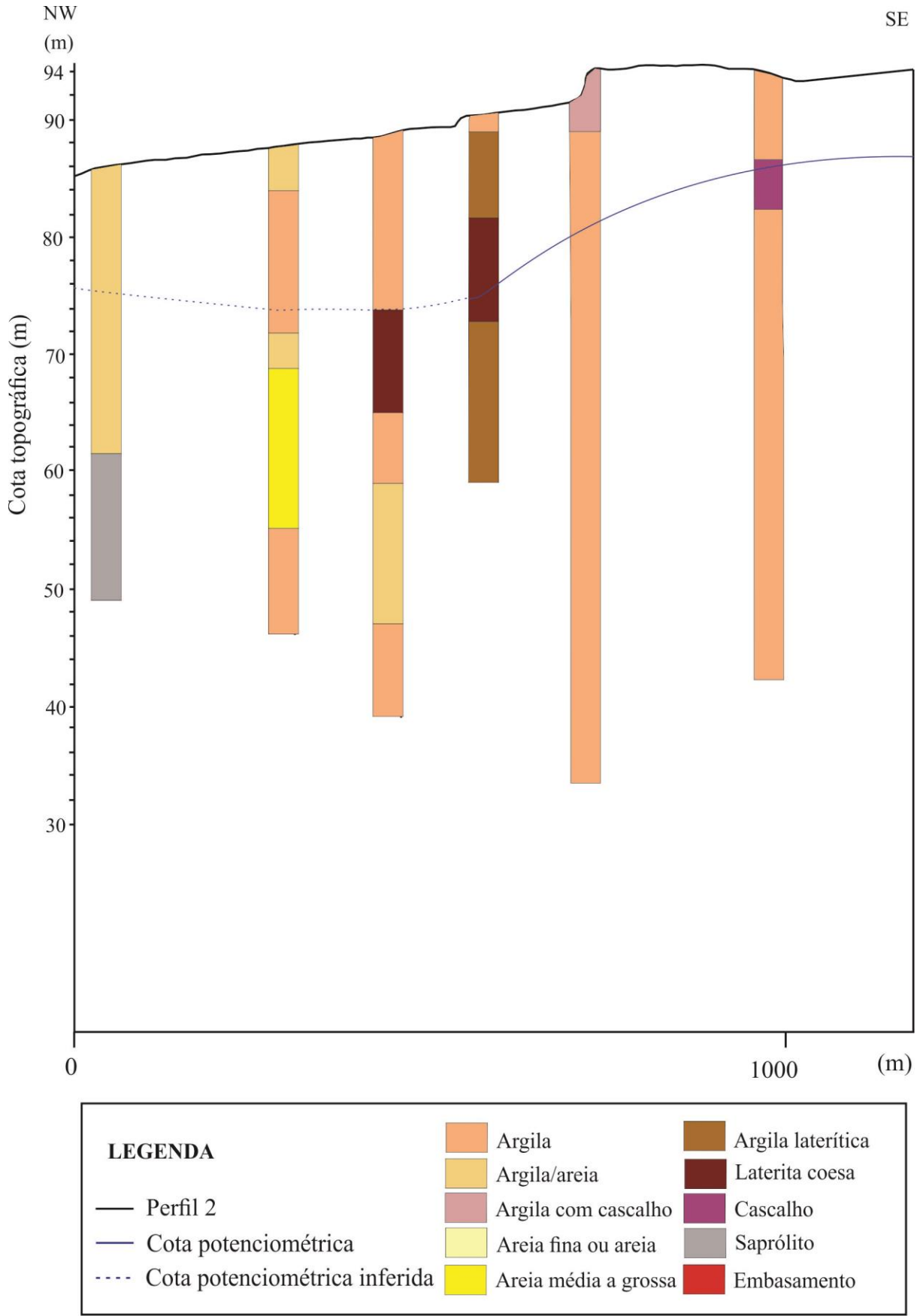
VIDAL, C. L. R. **Disponibilidade e gerenciamento sustentável do aquífero Serra Grande no município de Picos – Piauí.** 2003. 194f. Tese (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia), Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2003.

## **APÊNDICES**

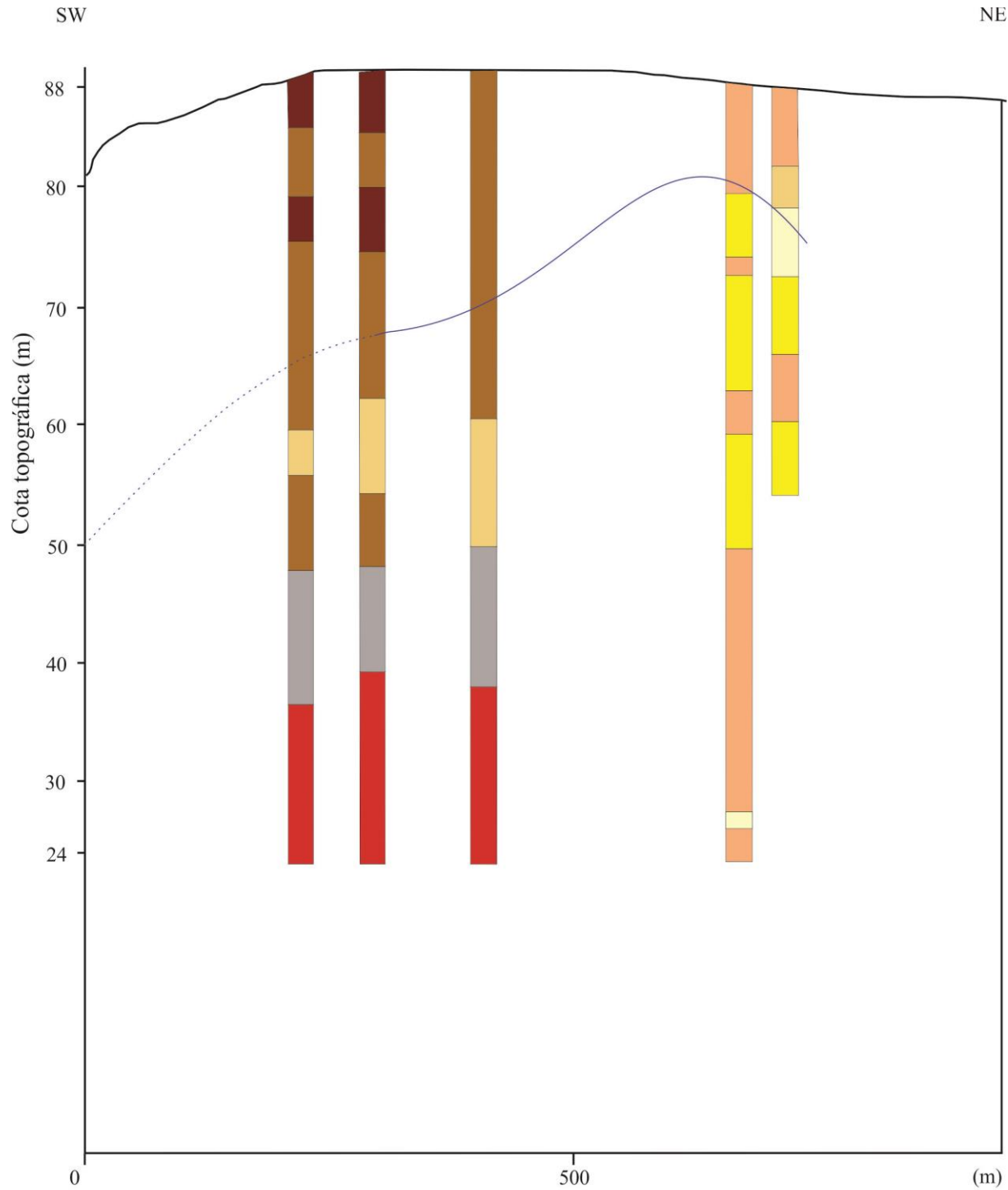
**Apêndice A** – Perfil topográfico 1. Base de dados: perfis estratigráficos (CPRM, 1997, com atualização permanente).



**Apêndice B** – Perfil topográfico 2. Base de dados: perfis estratigráficos (CPRM, 1997, com atualização permanente).

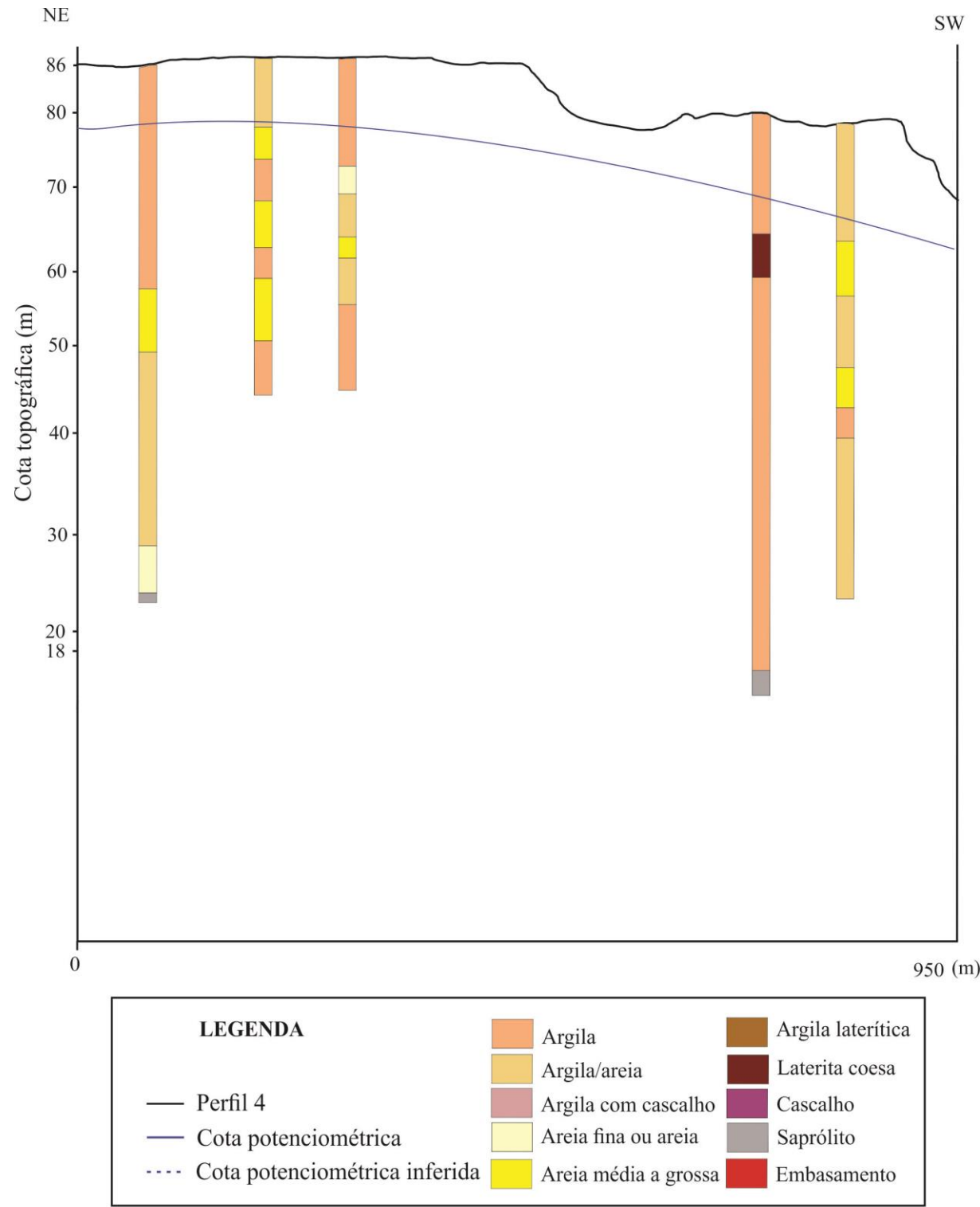


**Apêndice C** – Perfil topográfico 3. Base de dados: perfis estratigráficos (CPRM, 1997, com atualização permanente).

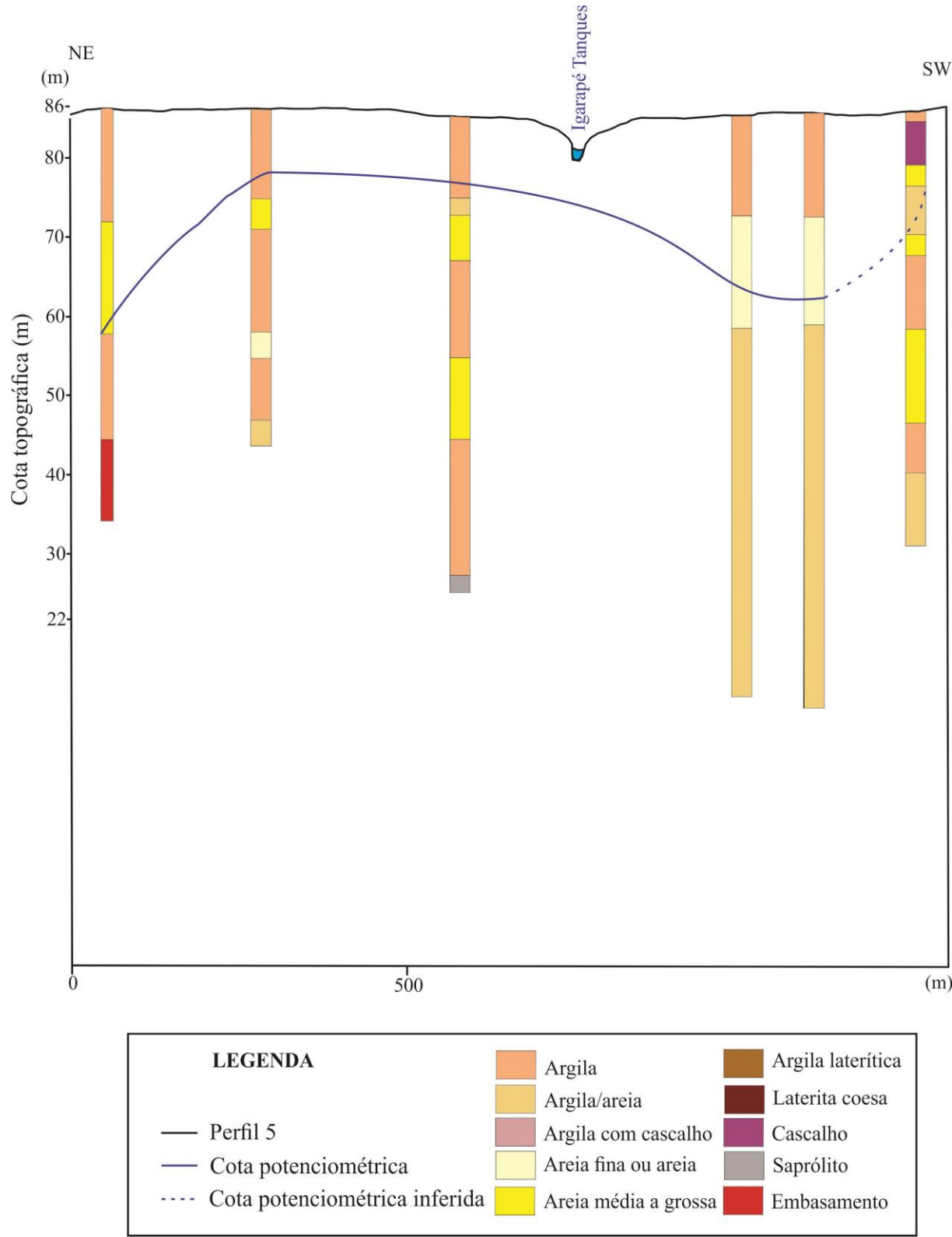


LEGENDA		
— Perfil 3	Argila	Argila laterítica
— Cota potenciométrica	Argila/areia	Laterita coesa
.... Cota potenciométrica inferida	Argila com cascalho	Cascalho
	Areia fina ou areia	Saprólito
	Areia média a grossa	Embasamento

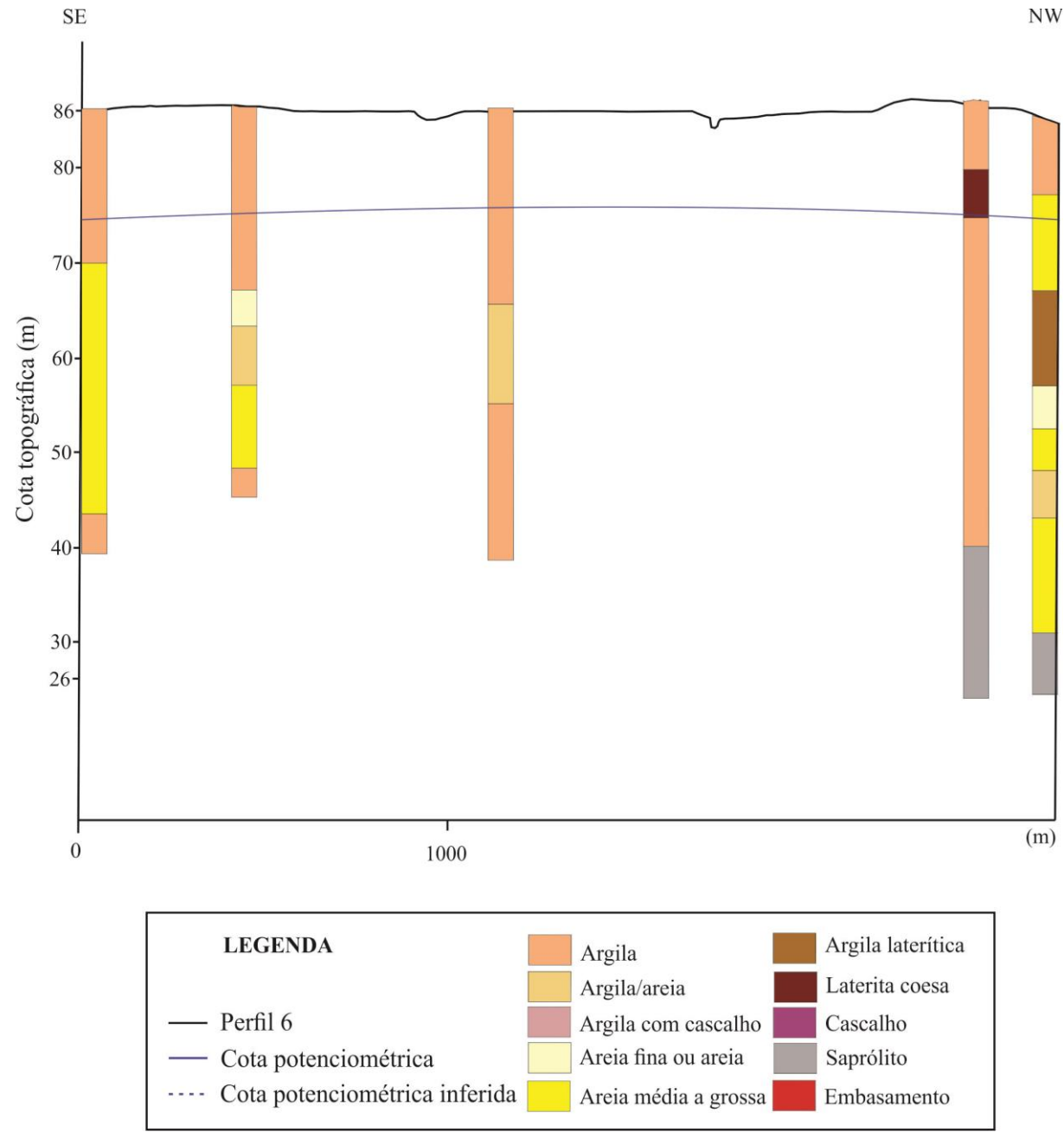
**Apêndice D**– Perfil topográfico 1. Base de dados: perfis estratigráficos (CPRM, 1997, com atualização permanente).



**Apêndice E** – Perfil topográfico 1. Base de dados: perfis estratigráficos (CPRM, 1997, com atualização permanente).

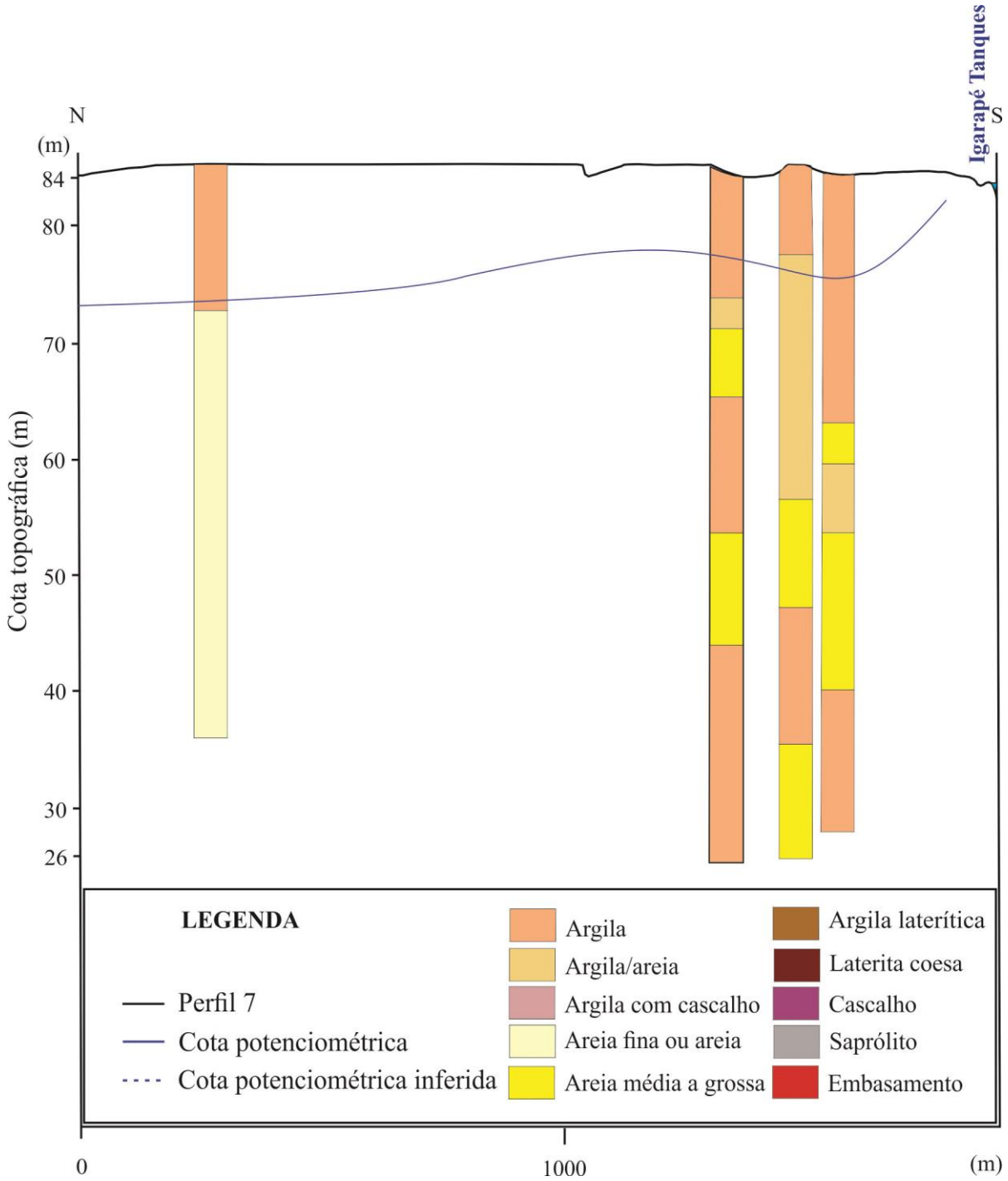


**Apêndice F**– Perfil topográfico 1. Base de dados: perfis estratigráficos (CPRM, 1997, com atualização permanente).

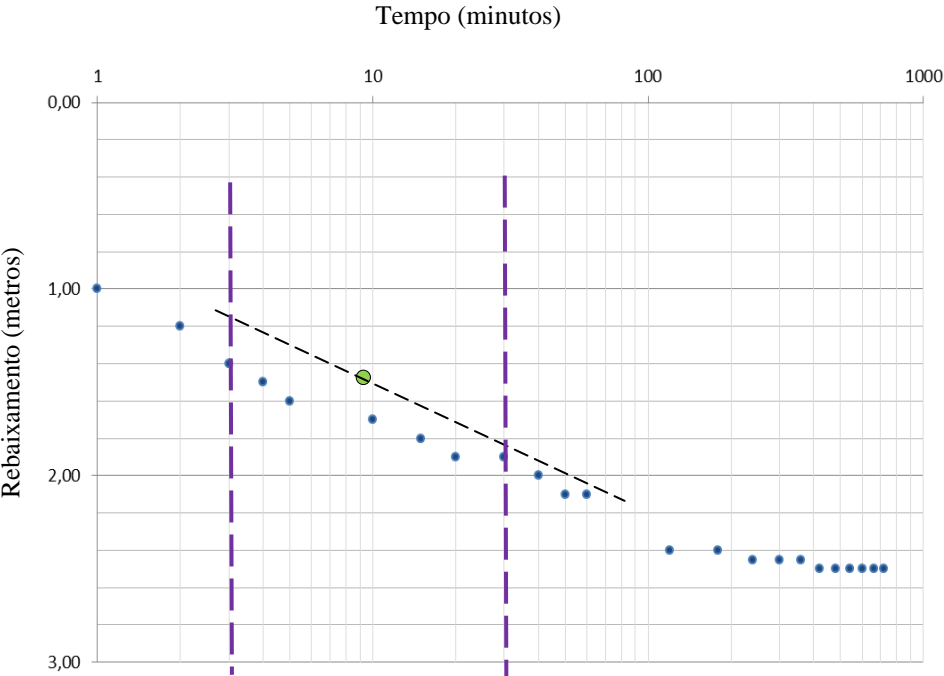




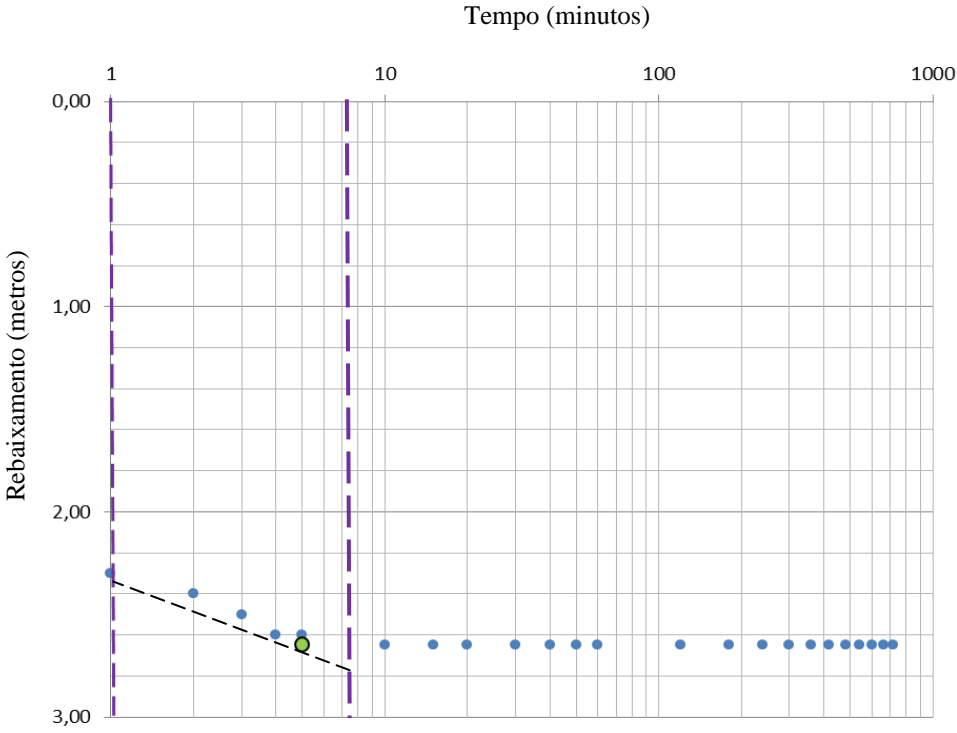
**Apêndice G**– Perfil topográfico 1. Base de dados: perfis estratigráficos (CPRM, 1997, com atualização permanente).



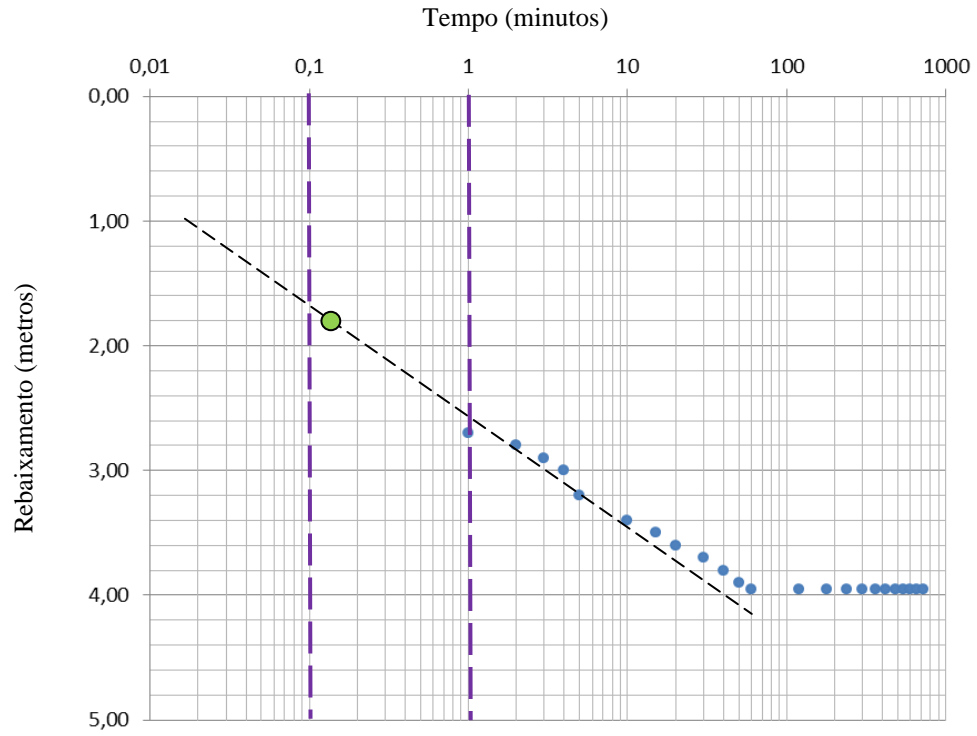
**Apêndice H** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço Guajará. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



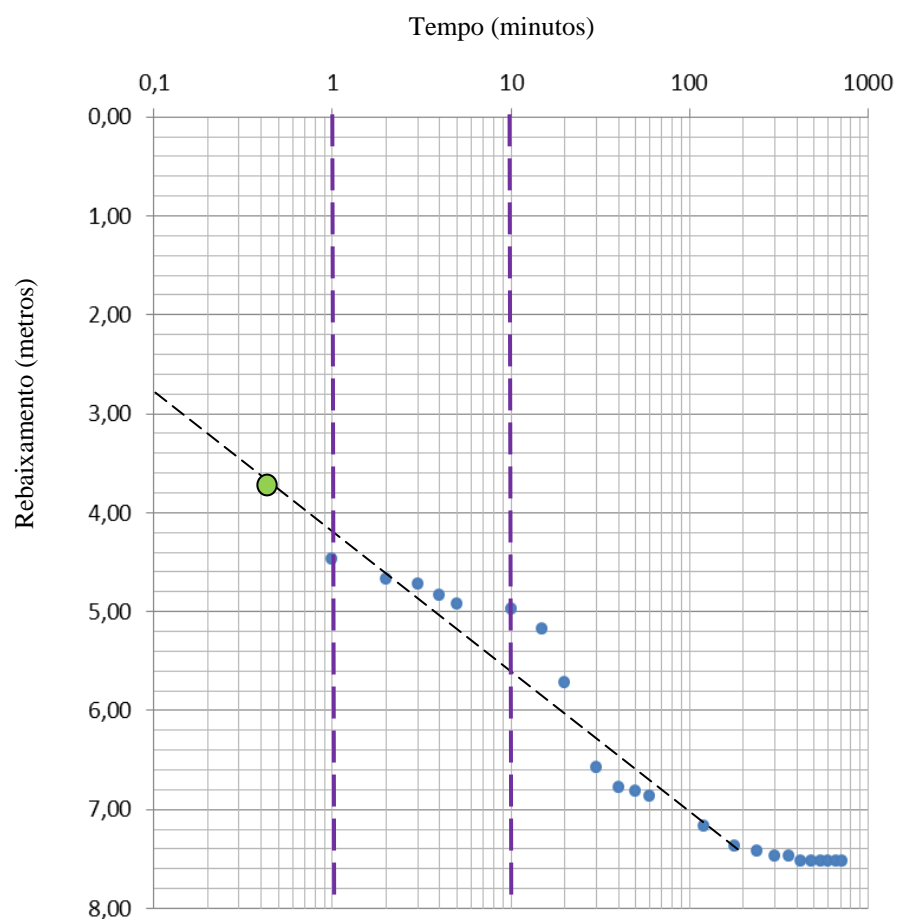
**Apêndice I** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 1 – Pirâmide. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



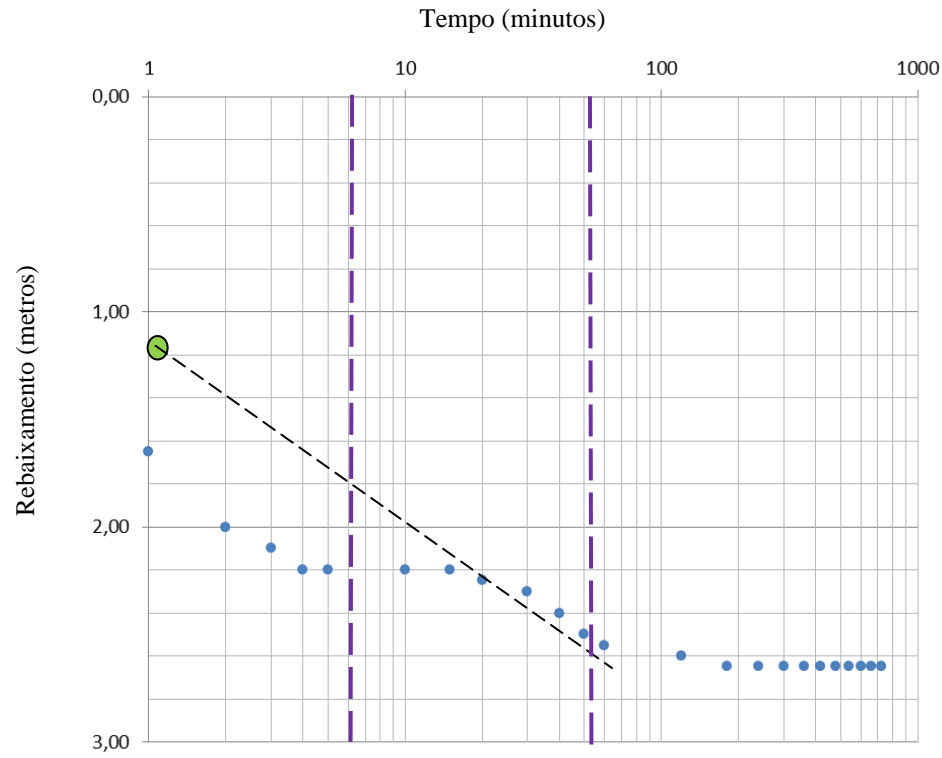
**Apêndice J** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 1 – Marcos Freire. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



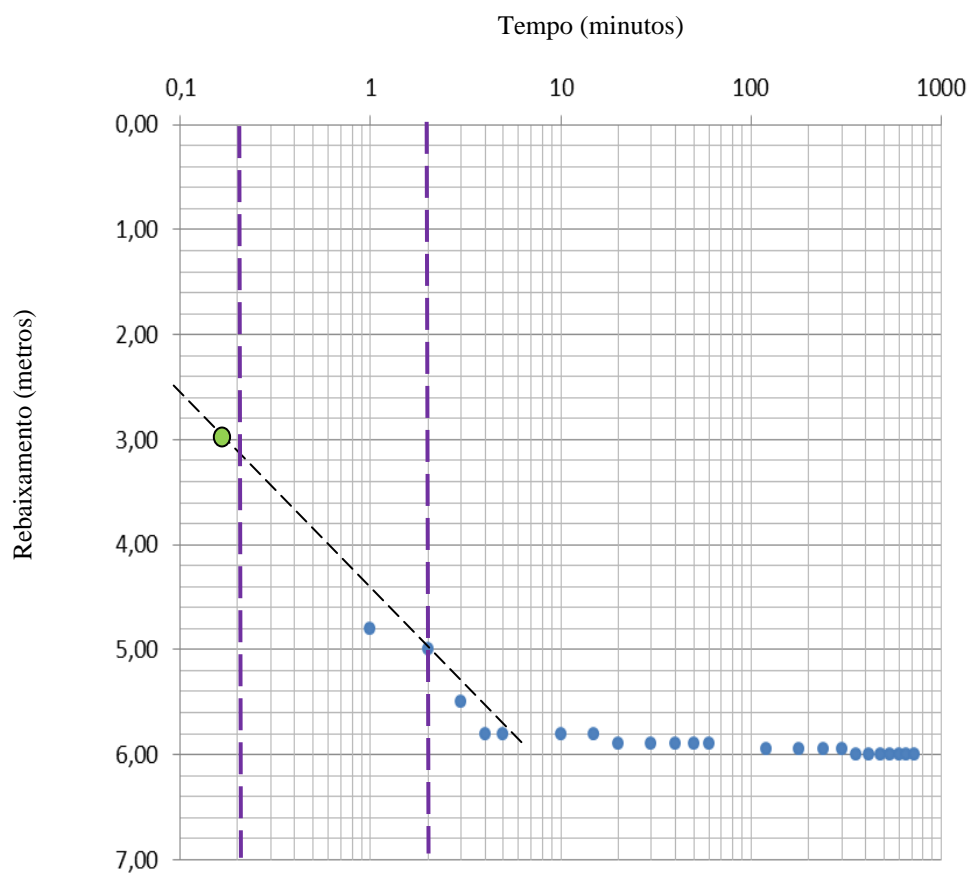
**Apêndice K** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 2 – RIII Tancredo Neves. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



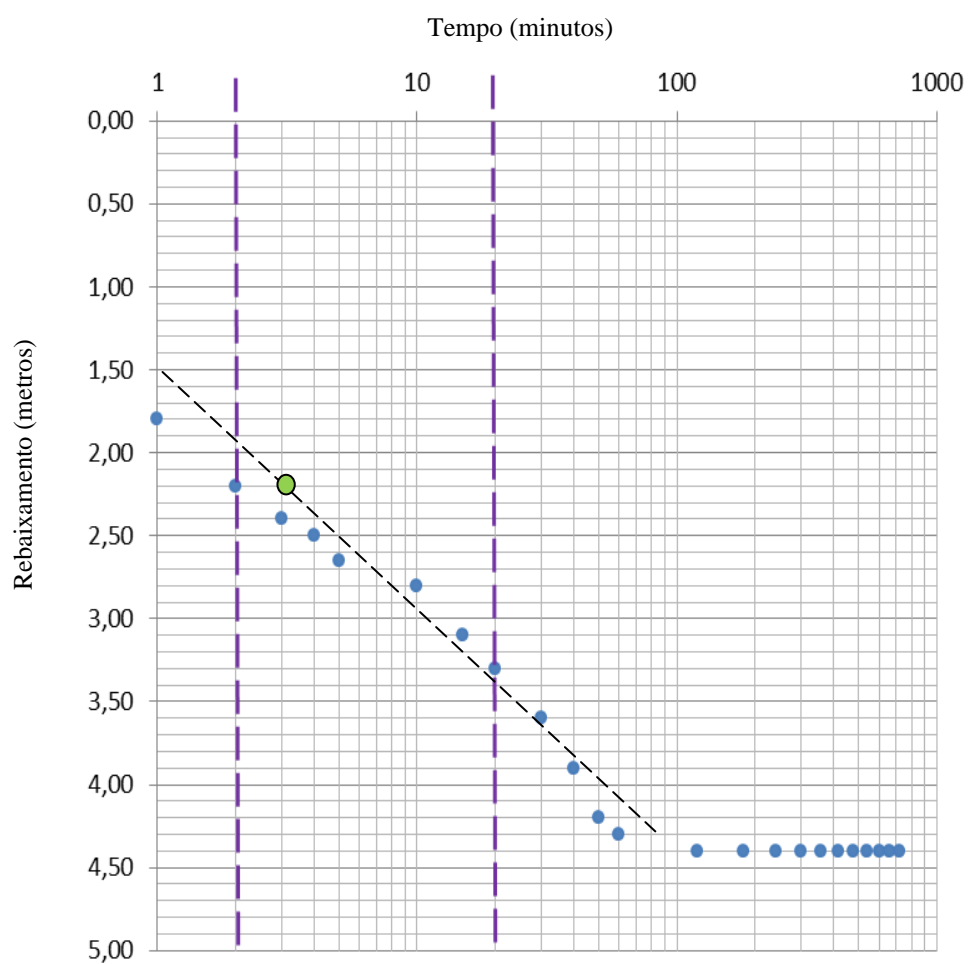
**Apêndice L** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço Conjunto Antares. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



**Apêndice M** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS – Buritis. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).

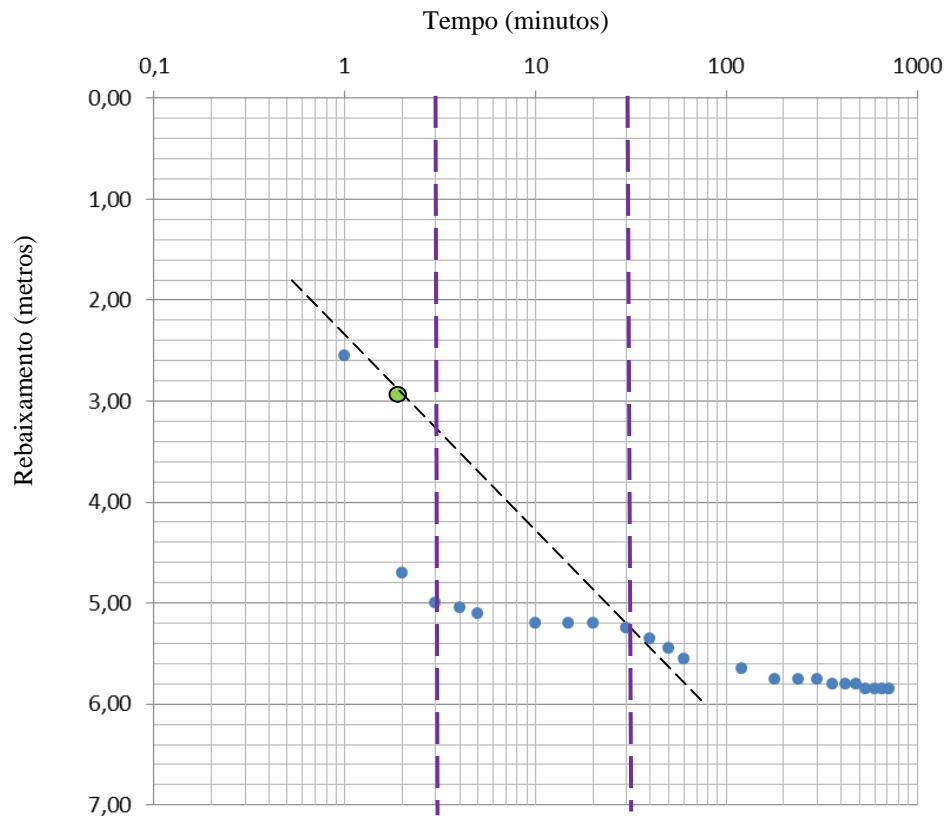


**Apêndice N** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS I – SAA C. Lobo. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).

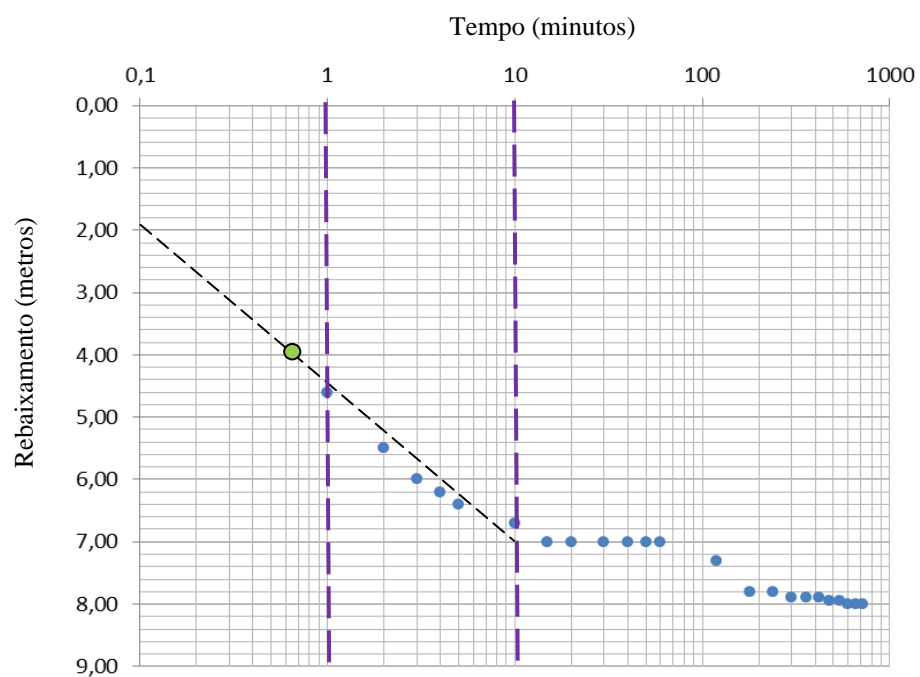




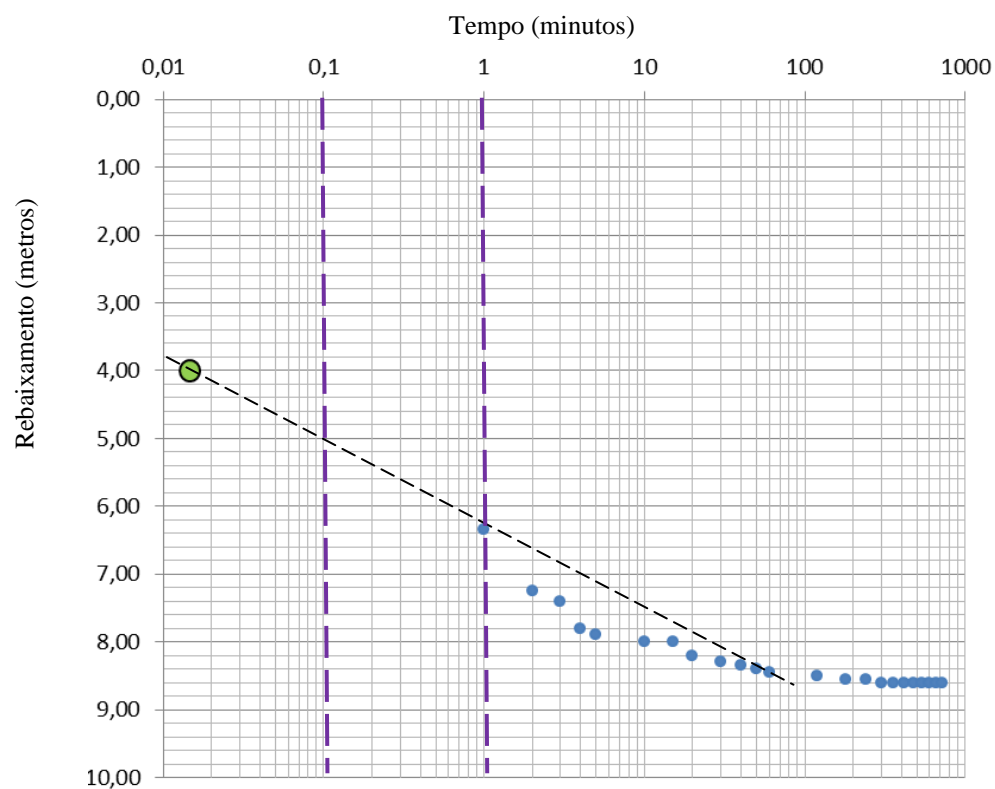
**Apêndice O** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço Conjunto Acapu. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



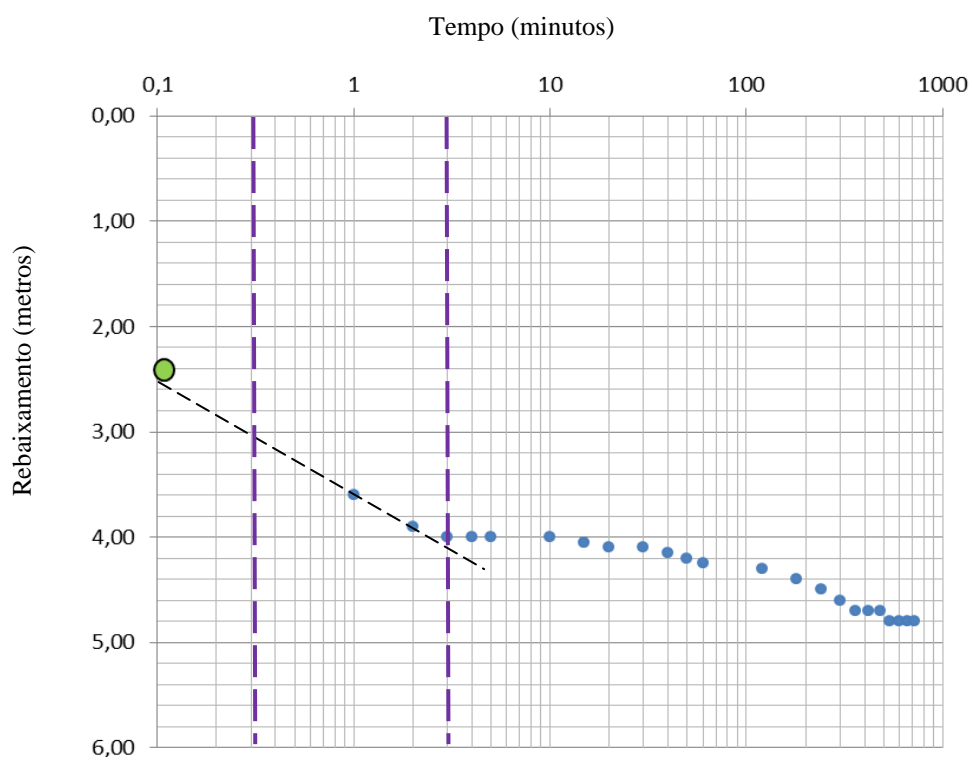
**Apêndice P** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 1 – SAA Conjunto Rio Mamoré. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



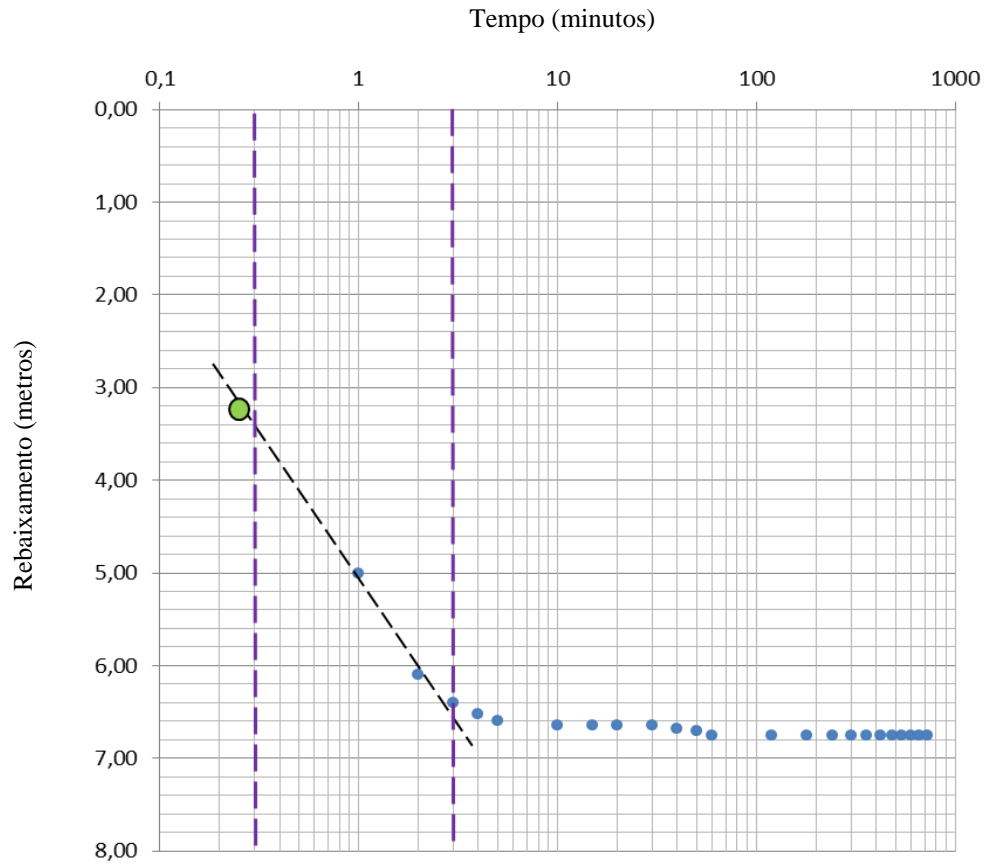
**Apêndice Q** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 2 – SAA Ronaldo Aragão. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



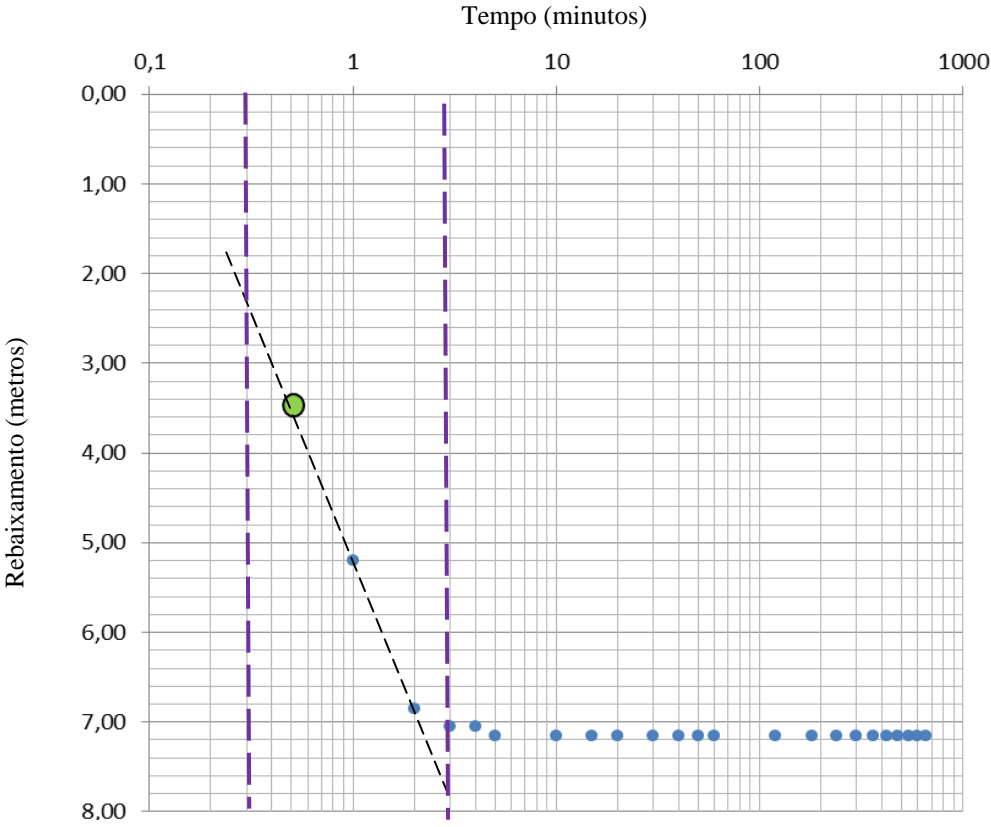
**Apêndice R** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 5 – Tancredo Neves. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



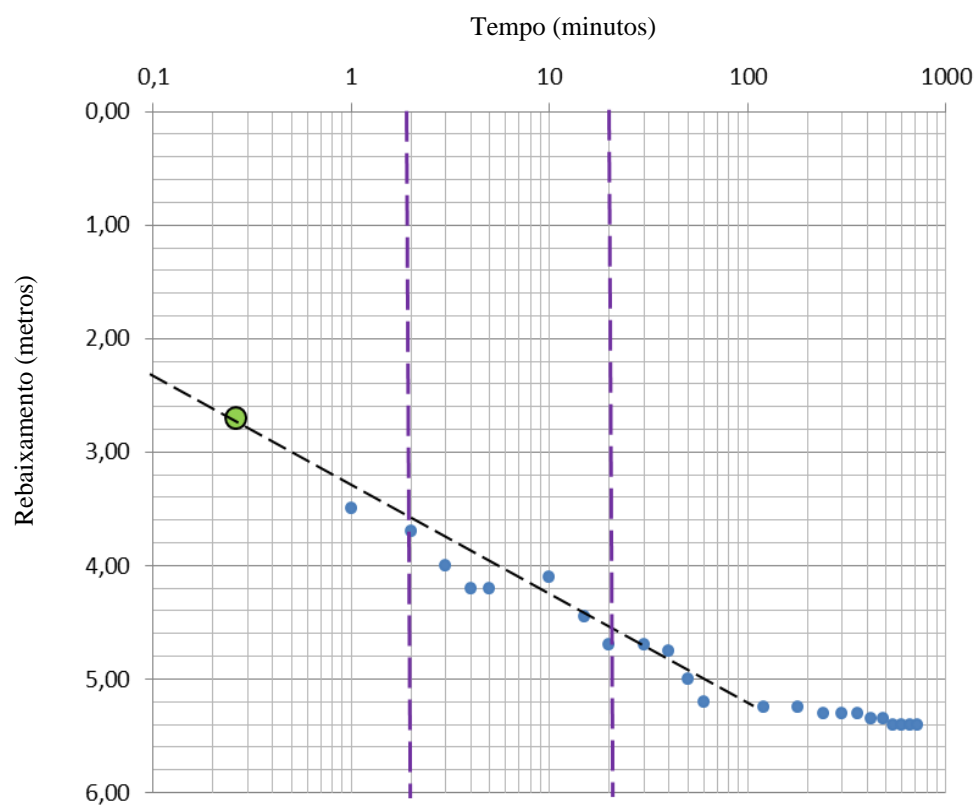
**Apêndice S** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 29 – Cohab I e II. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



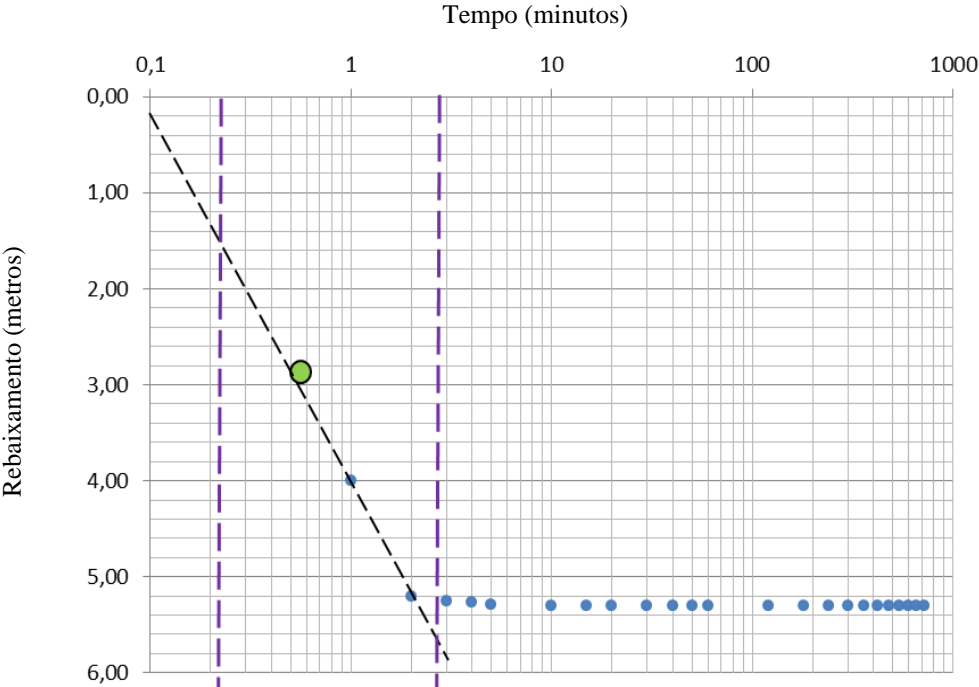
**Apêndice T** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 5 – Chagas Neto. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



**Apêndice U** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 2 – SAA do Lobo. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).



**Apêndice V** – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço PBS 3 – Chagas Neto. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).





**Apêndice X** – PBS 9 – Gráfico do rebaixamento pelo tempo interpretado pelo método do ponto de inflexão de Hantush, poço Tancredo Neves. Base de dados: teste de bombeamento (CAERD, 2004).

